

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Flugsysteme

Verhaltensanalyse der Beanspruchung des Operators in der Multi-UAV-Führung

Dipl.-Ing. Diana Donath

Vollständiger Abdruck der bei der
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte Dissertation.

Vorsitzender	Prof. Dr.-Ing. Roger Förstner
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Axel Schulte
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Ludger Schmidt

Diese Dissertation wurde am 07. Dezember 2011 bei der Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 14. Dezember 2011 angenommen.

Tag der Prüfung: 04.Mai.2012

Unterhaching, 21. Juni 2012

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Flugsysteme an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Professor Dr.-Ing. Axel Schulte. Als Doktorvater eröffnete er mir den wunderbaren Blick in die Welt der Wissenschaft. Gemeinsame fachliche wie auch menschliche Diskussionen inspirierten und ermutigten mich, führten zu entscheidenden Anstößen und neuen Betrachtungsweisen und trugen damit wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Das dabei über all die Jahre entgegengebrachte Vertrauen, die kontinuierliche Offenheit für Gespräche, Fragen und Probleme, sowie die mir gebotene Möglichkeit zum wissenschaftlichen Austausch auf internationalen Konferenzen lassen mich die zurückliegenden Jahre für immer in schöner Erinnerung behalten.

Des weiteren gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Ludger Schmidt für das entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit und die offene und freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Koreferates.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den über die Jahre gewonnen Freunden und Kollegen des Instituts für die freundliche Atmosphäre, die gemeinschaftliche Zusammenarbeit im Team und die angeregten Diskussionen bedanken.

Herausheben möchte ich dabei Gregor Jarasch, meinen stets treuen, begleitenden „wingman“, der mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite stand, mich immer wieder ermutigte und damit über die Jahre zu einem ganz besonderen Freund geworden ist.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei Felix Maiwald, Stefan Gangl und Johann Uhrmann bedanken. Auch sie waren privat wie auch beruflich immer für mich da. Durch die vielen gemeinsamen Unterhaltungen und Erlebnisse wurde hier eine wunderbare Vertrautheit und Freundschaft aufgebaut.

Mein Dank gilt auch Ruben Strenzke, Stefan Brüggewirth und Wolfgang Pecher für die zahlreichen Fachdiskussionen, Dr. Michael Strohal (Mike²) und Dr. Michael Kriegel (Mike) für die offenen und ehrlichen Gespräche, insbesondere in den letzten Zügen dieser Arbeit, die mich immer wieder auf den richtigen Weg zurück führten.

Auch möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Stütz als Institutsleiter für die hilfreichen Ratschläge, insbesondere auch für die Unterstützung beim Übergang in das Berufsleben bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank der Werkstatt für die Unterstützung beim Aufbau der Experimentalanlagen und dem Sekretariat, allem voran Madeleine Gabler, die durch ihre freundliche Unterstützung stets eine angenehme Atmosphäre schuf.

Diese Arbeit lebt von ihren experimentellen Ergebnissen. Für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Experimente gilt mein Dank dem MUM-T- und MiRA-T-Team, insbesondere auch Andreas Benzler. Sie schufen die wesentlichen Grundzüge der hier verwendeten Simulationsumgebung.

Auch gilt der Dank den Studenten, stellvertretend genannt hier Matthias Schulz und Sebastian Müller, die durch ihr außerordentliches Engagement in der Vorbereitung und Durchführung der Experimente einen wesentlichen Beitrag für diese Arbeit lieferten.

Nicht zu vergessen, der Dank an die Versuchspersonen der Heeresfliegerwaffenschule 1. Inspektion,

der Stab Fliegenden Abteilung 101 / 261 / 361 und des Transport Hubschrauber Regiments 30, die die Durchführung der Experimente erst ermöglichten.

Besonderer Dank gilt hier Florian Seibl und Alexander Höhn die stets mit großem persönlichem Engagement neben den Hauptkampagnen auch für verschiedene Vorexperimente immer wieder zur Verfügung standen.

Abschließend gilt mein Dank meiner Familie, die in all den Jahren viel auf mich verzichten musste und mir dennoch stets Verständnis, Geduld und aufmunternde Worte entgegenbrachte.
Vielen Dank dafür.

Kurzfassung

Diese Dissertation beschäftigt sich mit der *experimentellen Stimulation, Beobachtung und Messung*, sowie der *Modellierung* von Verhalten, insbesondere sogenannter *selbstadaptiver Strategien*, von *multi-UAV-Bedienern* in Aufgabenstellungen mit *hoher Arbeitsbelastung*. Dabei gelingt es, *Mitigationsstrategien* von Piloten unter hoher „Workload“ quantitativ zu erfassen und zu beschreiben. Dies ist ein Beitrag zur *automatisierten Erkennung von Überforderungssituationen* im Cockpit im Hinblick auf die Weiterentwicklung von Assistenzsystemen. Die zentralen Aspekte der Arbeit sind dabei:

1. die systematische Ableitung eines *Konzepts zur Überforderungserkennung* auf der Basis von *Interaktionsbeobachtungen* (manuelle und visuelle Interaktionen, d.h. Blickbewegungsmessung) und *Verhaltensmodellen* als Teilkomponente *wissensbasierter, adaptiver Operateurassistenzsysteme*;
2. der Aufbau und die Durchführung *komplexer Mensch-Maschine-Experimente* in der virtuellen Echtzeit-Simulation einer *Manned-unmanned Teaming Mission* (d.h. Führung mehrerer UAVs aus dem Cockpit eines bemannten Hubschraubers) mit dem Ziel der Provokation *selbstadaptiver Verhaltensstrategien* durch *hohe Arbeitsbelastung*, welche dann als Indikator der *subjektiven Beanspruchung* und der damit letztlich auch der *Überforderung* herangezogen werden können, und der quantitativen und objektiven Messung entsprechender Verhaltensparameter zur anschließenden Beschreibung der Beobachtungen;
3. die geschlossene *Rechnermodellierung* entsprechend gemessener Verhaltens- bzw. Interaktionsmuster mit Hilfe von *Hidden-Markov-Modellen* sowie deren Validierung durch die *automatische Erkennung* von Aufgabenkontexten und Unteraufgaben anhand beobachteter Interaktionssequenzen.

Die Dissertation beschreibt dazu die zu Grunde liegende Theorie der *wissensbasierten Assistenzsysteme*, der *adaptiven Automation* und die state-of-the-art *Methoden zur Bestimmung subjektiver Beanspruchung*. Der erarbeitete Konzeptansatz, die experimentellen Resultate und die entwickelten maschinellen Lernverfahren liefern die *konzeptionellen, methodischen und algorithmischen Grundlagen* für eine automatisierte Systemkomponente eines wissensbasierten, adaptiven Assistenzsystems, welches in der Lage ist, *durch reine Verhaltensbeobachtung* die Aufgabe und drohende Überforderungssituationen zu erkennen. Damit ist in dieser Arbeit der *grundsätzliche Machbarkeitsnachweis* für eine derartige maschinelle Fähigkeit gelungen.

Das wesentliche *erfahrungswissenschaftliche Resultat* der Arbeit ist die Beobachtung, dass Piloten bei der multi-UAV-Führung nicht, wie zunächst zu erwarten, auf extreme Belastungssituationen mit einem massiven Anstieg der *subjektiven Beanspruchung* reagieren, welches dann gegebenenfalls zu deutlichen *Leistungseinbrüchen* führen könnte, sondern mit *aufgabenspezifischen, selbstadaptiven Strategien* die drohende Überforderungssituation möglichst weit hin-

ausschieben. Die Registrierung dieser Verhaltensmuster erlaubt somit die proaktive Erkennung von Überforderung.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Kurzfassung	iii
1 Einführung	1
1.1 Auswirkungen erhöhten Automationseinsatzes	4
1.2 Assistenzsysteme - eine Lösungsalternative	7
1.3 Forschungsfragestellung der Arbeit	8
1.4 Aufbau der Arbeit	9
2 Assistenzsysteme	11
2.1 Theorie der Assistenzsysteme	11
2.1.1 Einbettung des Assistenzsystems in ein Arbeitssystem	12
2.1.2 Anforderungen an ein Assistenzsystem als elektronisches Teammitglied . . .	14
2.2 Operateuradaptivität durch Adaptive Automation	17
2.3 Adaptive Fähigkeiten realisierter Assistenzsysteme	21
2.3.1 COGnitive cockPIT - COGPIT	21
2.3.2 Pilot's Associate (PA) und Rotorcraft Pilot's Associate (RPA)	25
2.3.3 CASSY und CAMA	28
3 Methoden zur Erfassung der Operateurbeanspruchung	32
3.1 Überforderung - ein Teil der Beanspruchung	32

3.2	Definitionen, Abhängigkeiten und Zusammenhänge: Belastung-Beanspruchung-Leistung	34
3.3	Rückschluss auf Operateurbeanspruchung - verschiedene Ansätze	38
3.3.1	Fragebogenmethoden	40
3.3.2	Leistung in der Hauptaufgabe	41
3.3.3	Leistung in Nebenaufgaben	42
3.3.4	Situationsgetriggelter Rückschluss auf eine mögliche Operateurbeanspruchung	44
3.3.5	Analytische Beanspruchungsbestimmung durch Ressourcenmodelle	45
3.3.6	Physiologische Methoden	46
3.3.7	Verhaltensmodelle	47
4	Konzept	50
4.1	Entscheidung für den verhaltensbasierten Ansatz	50
4.2	Detailbetrachtungen zum verhaltensbasierten Ansatz	53
4.3	Experimental Design zur Modelldatengewinnung	59
5	Experimentelle Modelldatengewinnung	62
5.1	Experimental Design	62
5.1.1	Experimentelle Aufgabenstellung	62
5.1.1.1	Szenario	63
5.1.1.2	Indikatoraufgabe und Aufgabendekomposition	65
5.1.2	Belastungsvariation	71
5.1.3	Experimentelle Messwerterfassung und Datenerhebung	72
5.1.3.1	Erfassung visueller Interaktionen	73
5.1.3.2	Erfassung manueller Interaktionen	76
5.1.3.3	Videobasierte Erfassung der Interaktionen	77
5.1.3.4	Erfassung des Situationskontextes	78

5.1.3.5	Diskrete Erfassung der Beanspruchung	79
5.1.3.6	Erfassung der Leistung	80
5.1.3.7	Sonstige Experimentelle Datenerhebung	81
5.1.3.8	Semantische Zuordnung	84
5.1.4	Versuchsumgebung	86
5.1.5	Hubschrauber-Forschungsflugsimulator	86
5.1.6	UAV-Operateurarbeitsplatz	87
5.1.7	Operateurbeobachtungsstation	90
5.1.8	Gesamtsystem	92
5.2	Durchführung	94
5.2.1	Versuchspersonen	94
5.2.2	Versuchsablauf	95
5.2.3	Briefing und Debriefing	96
5.3	Akzeptanz der Simulationsumgebung	98
5.3.1	Eignung des Kommandantenarbeitsplatzes	98
5.3.2	Vorbereitung auf die Multi-UAV-Führung	98
5.3.3	Empfundene Beanspruchungssteigerung	99
5.3.4	Akzeptanz Messanlage	100
5.3.5	Auswirkungen zeitdiskreter Unterbrechung zur Fragebogenerhebungen	100
6	Experimentelle Ergebnisse	101
6.1	Subjektive Beanspruchung	101
6.2	Leistung	104
6.2.1	Anzahl klassifizierter Objekte	105
6.2.2	Fehler bei der Objektklassifizierung	107
6.2.3	Zeit zur Objektidentifizierung	108

6.2.4	Bedienfehler	111
6.3	Beobachtete Änderungen im Verhalten der Versuchspersonen	112
6.3.1	Proaktive Aufgabenreduktion	113
6.3.2	Weniger exakte Aufgabendurchführung	114
6.3.3	Vernachlässigen von Teilaufgaben	115
6.3.4	Vollständiges Vernachlässigen der Objektidentifizierungsaufgabe	117
6.3.5	Gezielte Verzögerung der Aufgabenvervollständigung	118
7	Modellierung	121
7.1	Charakteristika beobachteter Verhaltenssequenzen	122
7.2	Hidden Markov Modelle als Modellierungsansatz	125
7.3	HMM - Formale Definition	126
7.4	Grundlegende Aufgaben bei HMMs	127
7.4.1	Evaluation	129
7.4.2	Training	130
7.4.3	Dekodierung	133
7.5	Anwendungen von Hidden Markov Modellen in der Verhaltensmodellierung	134
7.6	Modellerstellung	135
7.6.1	Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Modellentwicklung	135
7.6.2	Definition Initialmodell	136
7.6.3	Vorverarbeitung und Auswahl der Training- und Validierungsdatensätze	139
7.6.4	Training der Modelle	140
7.6.5	Modellvalidierung durch Erkennung der Aufgabensituation	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	156
	Literaturverzeichnis	172

A Fragebogen	173
B Scaling	181
C Logarithmische Berechnung des Viterbi-Algorithmus	183
D Evaluierungssequenzen	185
E Trainingssequenzen	186
F Emissionsmatrizen	195
G Sakkaden und Fixationen	198

Kapitel 1

Einführung

Unbemannte Luftfahrzeuge (Uninhabited Aerial Vehicles - UAVs) werden in künftigen militärischen Einsatzkonzepten unentbehrlich sein. UAVs sind vor allem dann von Vorteil, wenn es darum geht, die Gefährdung von Menschenleben zu vermeiden, aber auch um bestimmte Fähigkeiten darzustellen, sowie die Einsatzdauer zu verlängern. Heutige Einsatzszenarien sehen die Verwendung von UAVs insbesondere in der *Unterstützung* als Kommunikations- und Relaisfunktion, zur Zielbeleuchtung und Zieldarstellung, in der *Aufklärung*, als zusätzliche bildgebende und signalerfassende Informationsquelle, aber auch für das Aufspüren und Abgrenzen von CBRN¹ und explosiven Substanzen, sowie zukünftig im Rahmen von Kampfeinsätzen als Täusch-, Stör-, oder Kampfdrohen vor [Freiwald, 2007] [Bundestag, 2009].

Bislang erfolgt die Steuerung und Führung von UAVs meist durch mehrere Operateure in einer Bodenkontrollstation. So benötigen die im Einsatz befindlichen US-amerikanischen UAVs Predator, Hunter, wie auch Shadow je eine zwei-Mann-Crew, bestehend aus Pilot (AVO²) und Sensorbediener (PO³) um operationell einsatzfähig zu sein [Cummings u. a., 2008]. Global Hawk hingegen ist hierfür auf bis zu sechs Personen angewiesen⁴.

Untersuchungen der Einsätze in Pakistan, Afghanistan und Irak [Bundestag, 2009] zeigen, dass die Anzahl der dort eingesetzten UAVs stetig steigt. Unter Berücksichtigung des dafür nötigen Personalbedarfs entwickelte sich auf Seiten des Militärs die Forderung, den Personalaufwand für die Führung von UAVs zu reduzieren, um gegebenenfalls die bisherige Führungsspanne von n:1 möglicherweise sogar zu invertieren [Cummings u. a., 2008]. Dies würde bedeuten, dass zukünftig nicht mehr mehrere Operateure ein einzelnes UAV (n:1) führen und einsetzen sollen, sondern vielmehr, dass mehrere UAVs durch einen Operateur zu führen sind (1:n).

Um eine Invertierung der Führungsspanne zu erreichen, bedarf es nach [Cummings u. a., 2007] [Cummings u. a., 2008] entsprechender Automation im Bereich im Flugsteuerung, der Navigation und des Mission- und Nutzlastmanagements. Meist wird dabei auf hierarchisch aufeinander aufbauende Flugführungsschleifen zurück gegriffen (siehe Abbildung 1.1).

Offensichtlich ist, dass eine gleichzeitige Führung (Steuerung) mehrerer UAVs durch kontinuierliche, direkte Steuereingaben eines Operateurs aufgrund psycho-physiologischer Limitationen nicht möglich ist. Dazu bedarf es eines höheren Abstraktionsgrads der Interaktion, welches im Allgemeinen durch Hinzufügen weiterer Automationsfunktionen erreicht wird. Somit ergibt sich als niedrigste mögliche Führungsebene mehrerer UAVs, jenseits der nicht praktikablen kontinuierlichen, manuellen Steuerung durch einen Operateur zunächst die Steuerung über Autopilotenfunktionen. Um die UAVs auf dieser Ebene führen zu können, muss der menschliche Operateur entsprechende

¹chemisch, biologisch, radiolaktiv, nuklear

²Air Vehicle Operator

³Payload Operator

⁴(mission planning (MCE), sensor data and processing (MCE), air vehicle command and control (MCE), communications (MCE), mission planning (LRE), air vehicle command and control (LRE))(MCE - Mission Control Element, LRE - Launch and Recovery Control Element)

Parameter für jedes zu führende UAV, sowie für jeden zur Verfügung stehenden Autopiloten-Mode vorgeben. Durch die immer wieder notwendige Anpassung dieser Parametervorgaben für alle zu führenden UAVs, resultiert die Führung auf dieser Ebene in einer unerwünscht hohen Beanspruchung des menschlichen Operators.

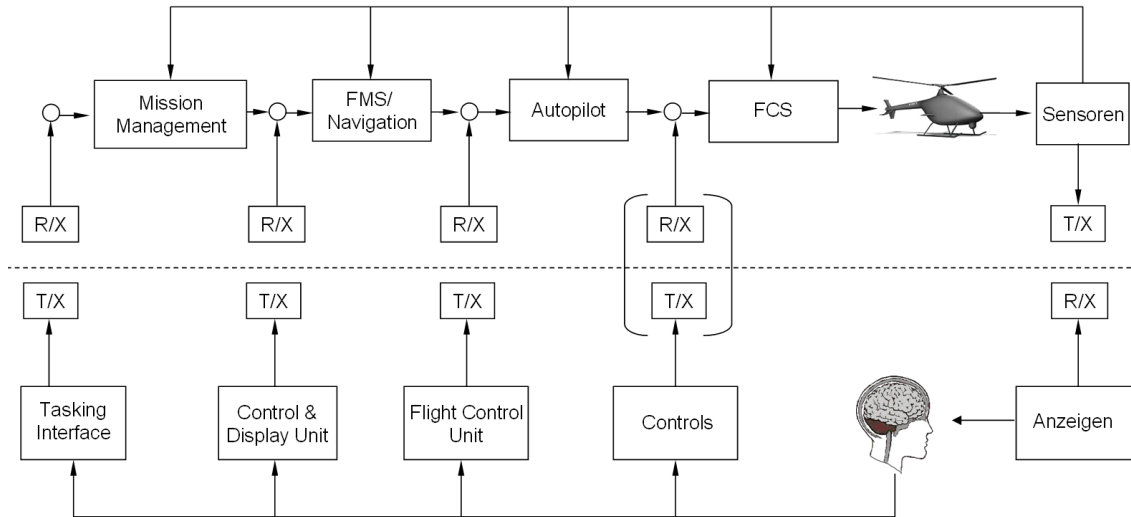


Abbildung 1.1: Flugführungsschleifen in der UAV-Führung

Die Führung mithilfe eines FMS (Flight Management System) ermöglicht es dem Operator die UAVs anhand von Wegpunkten bzw. Routen zu steuern. Diese Art der Führung benötigt nur mehr einen gelegentlichen Eingriff durch den UAV-Operator, so beispielsweise im Falle von unvorhergesehenen Situationsänderungen oder bei geänderten Zielvorstellungen (Absichten) des Operators. In derartigen Situationen, die zeitnahe Umplanungsaktivitäten mehrerer UAVs notwendig machen können, ist auch hier mit einem entsprechenden Anstieg der Beanspruchung des Operators zu rechnen. Dennoch lässt diese Führungsebene dem Operator mehr verbleibende Ressourcen, die dieser beispielsweise missionsspezifischen Aufgaben widmen kann.

Durch Hinzufügen weiterer, gegebenenfalls entsprechend „intelligenter“ Automation, kann es möglich gemacht werden, mehrere UAVs auf Missionsebene zu führen. Derartige Automation verlangt vom Operator dann lediglich z.B. die Vorgabe von Aufgaben und stellt damit den Operator von der eigentlichen Flugführungsaufgabe frei. Damit wird es dem Operator möglich, sich mehr den missionsorientierten Aufgaben zu widmen und dennoch parallel die UAVs, beispielsweise als abgesetzte Sensorplattformen, zu nutzen. Diese Führungsebene soll möglichst im Rahmen der Multi-UAV-Führung angestrebt werden, um den durch die UAVs bedingten Zusatzaufwand für den menschlichen Operator möglichst gering zu halten. Entsprechende Forschungsarbeiten am Institut für Flugsysteme (IFS) der Universität der Bundeswehr München zielen genau darauf ab [Uhrmann u. a., 2010b] [Uhrmann und Schulte, 2011].

Neben der generellen Tendenz zu weitergehender Automation mit dem Ziel der Verminderung des Personalaufwands bei der UAV-Führung zeichnet sich in den letzten Jahren ein weiterer Trend ab, der die Führung von UAVs nicht mehr ausschließlich von Bodenkontrollstationen vorsieht, sondern auch aus bemannten, fliegenden Plattformen.

Nach [Wilson, 2002] erfolgt die zukünftige Führung von UAVs von:

„... either the ground or the air, perhaps from AWACS or other such platform, or even from the cockpit of a manned fighter or bomber [or helicopter].“

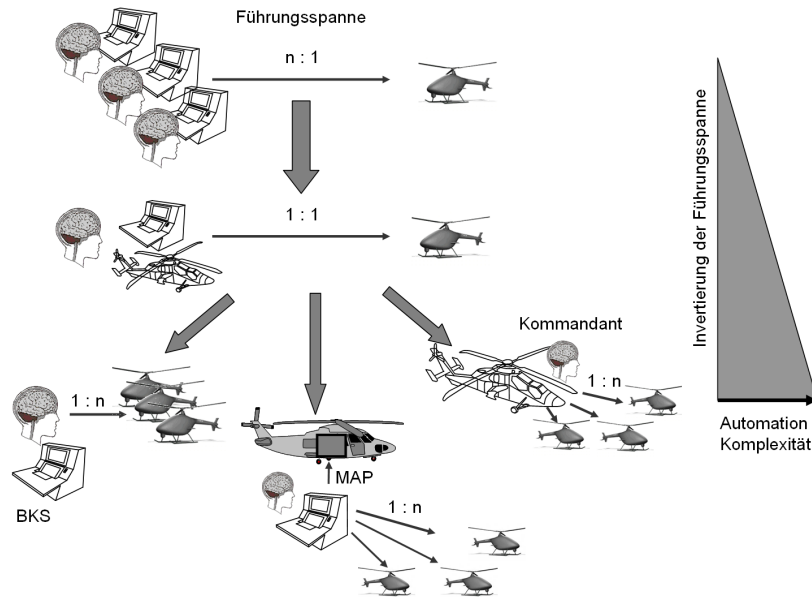


Abbildung 1.2: Optionen der UAV-Führung bei Invertierung der Führungsspanne

Abbildung 1.2 zeigt verschiedene Optionen der Multi-UAV-Führung bei Invertierung der Führungsspanne, d.h. der Führung mehrerer UAVs durch nur einen Operateur. So sehen zukünftige Konzepte die Führung mehrerer UAVs von unterschiedlichen Plattformen vor, beispielsweise von einer Bodenkontrollstation (BKS), einem Missionsausrüstungspaket (MAP) integriert in eine fliegende Plattform (z.B.: AWACS, NH 90), oder aus einem Cockpit (z.B. Kampfflugzeug, Kampfhubschrauber, Transporthubschrauber). Ziel dieser unterschiedlichen Konfigurationen ist es, maximale Flexibilität in der Führung und dem Einsatz der UAVs und damit der Missionsführung insgesamt zu gewinnen.

Diese optionale Form der Führung von UAVs, aus stationären, wie auch aus mobilen oder gar fliegenden Plattformen, aber auch die oben genannte Invertierung der Führungsspanne, waren in den letzten Jahren weltweit Forschungsgegenstand verschiedener Studien, welche zum Teil Simulationskampagnen, aber auch erste Flugversuche mit einbeziehen.

So untersuchte beispielsweise die britische Firma QinetiQ, beauftragt vom englischen Verteidigungsministerium (MOD) im Rahmen des Applied Research Programms (ARP), die Führung mehrerer UAVs durch einen Operateur, in diesem Fall durch einen Piloten eines Kampfflugzeuges. Als Grundlage verwendeten sie hierfür ein Multi-Agentensystem (MAS), das sich aus verschiedenen Agenten (User Agent, Group Agents, Specialist Planning Agents (z.B. *Search Agent*, *Attack Agent*), UAV Agents) mit jeweils unterschiedlichen Funktions- und Fähigkeitsbereichen zusammensetzt (vgl. [Baxter und Horn, 2005]). Dieses MAS kombiniert verschiedene KI-Techniken und ermöglicht es einem Operateur ein Team an UAVs zu führen. Hierfür steht dem Operateur ein Interface, basierend auf dem *PACT*-Framework (*Pilot Authority and Control of Tasks*), zur Verfügung, das es ihm erlaubt diese Führungsaufgabe mit Hilfe angepasster Automationsgrade umzusetzen. Neben Simulatorversuchen [Baxter und Horn, 2005] wurde im Frühjahr 2007 in ersten Flugversuchen erfolgreich die Führung von vier UAVs (1 reales, und 3 simulierte) durch einen Piloten an Bord eines fliegenden Kampfflugzeuges (Tornado) demonstriert [Baxter u. a., 2008].

Das *HRED* (Human Research and Engineering Directorate) des U.S. Army Research Laboratory (ARL) erprobte in Simulationskampagnen im Rahmen des AH-64D Apache Longbow Block III Upgrade Programms die Auswirkungen der Führung eines UAS (Uninhabited Aerial Systems) mit unterschiedlichen Interoperabilitätsgraden (*LoI* - *Level of Interoperability*) aus einem Apache AH-64D auf den Piloten (PI), sowie den Copilot-Gunner (CPG) [Durbin und Hicks, 2009]. Der Begriff

der Interoperabilitätsgrade definiert, basierend auf der STANAG 4586, den Grad der Kontrolle, welche ein Operateur über das Vehikel bzw. seine Sensornutzlast oder aber beides besitzt [Cumming u. a., 2006]. Im Rahmen des Longbow Block III Upgrade Programms wurde die Führung des UAS aus dem Hubschrauber durch den CPG unter Verwendung von den drei Interoperabilitätsgraden *LoI* II, *LoI* III und *LoI* IV untersucht. Hierbei sieht *LoI* II, die Übertragung von Daten bzw. Videostreams in das bemannte Cockpit vor, nicht jedoch die Steuerung des Vehikels entlang eines Flugpfades oder die Steuerung der Sensornutzlast. *LoI* III sieht neben der Daten-, beziehungsweise Videoübertragung eine Steuerung der Sensornutzlast vor, jedoch ebenfalls keine Steuerung des Flugpfades des UAS. *LoI* IV umfasst neben Daten- und Videoübertragung sowohl die Steuerung sowohl der Nutzlast als auch des Vehikels selbst. Im Rahmen des Programms wurden mögliche Auswirkung dieser Führungsmöglichkeiten auf die Beanspruchung, Crew-Koordination und das Situationsbewusstsein der Crew untersucht.

Das Institut für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr München untersucht im Rahmen des Projektes „*Manned-Unmanned Teaming*“ (*MUM-T*) in verschiedenen Simulationskampagnen [Uhrmann u. a., 2009] [Uhrmann u. a., 2010a] [Strenzke u. a., 2011] und Felddemonstrationen die Führung mehrerer UAVs durch den Kommandanten im Cockpit eines Transporthubschraubers.

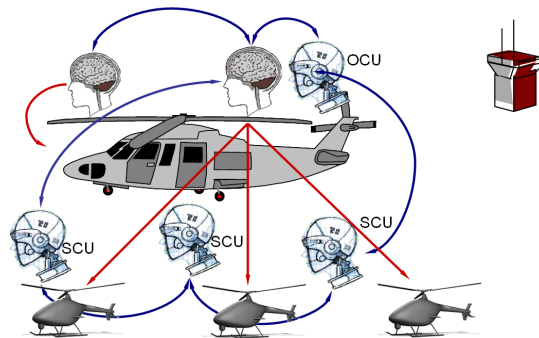


Abbildung 1.3: MUM-T Architektur mit intelligentem Operateurassistenzsystem und künstlichen kognitiven Einheiten an Bord der UAVs [Schulte, 2006]

Wesentliche Forschungsaspekte hierbei sind die Kooperation zwischen dem menschlichen Operateur und den hochautomatisierten UAVs, sowie die Kooperation der UAVs untereinander [Schulte, 2006] [Meitinger und Schulte, 2006a] [Meitinger und Schulte, 2006b] [Meitinger, 2008]. Grundlage für die Umsetzung dieser Kooperationen stellen dabei sogenannte künstliche kognitive Einheiten (ACU - Artificial Cognitive Unit) dar. Diese verfügen, im Gegensatz zu klassischer, konventioneller Automation (z.B. Autopilot), über Fähigkeiten, wissensbasiert und zieleorientiert in Anlehnung an Prozesse menschlicher Informationsverarbeitung [Onken und Schulte, 2010] zu agieren. Diese Grundlage ermöglicht es, unter Verwendung entsprechenden domänenspezifischen Wissens, UAVs auftragsbasiert zu führen [Uhrmann u. a., 2010a] [Uhrmann und Schulte, 2011]. Eine weitere Anwendung ist es, Operateure bei der UAV-Führungsaufgabe in Form eines wissensbasierten Assistenzsystems zu unterstützen [Rauschert u. a., 2008] [Rauschert und Schulte, 2011].

1.1 Auswirkungen erhöhten Automationseinsatzes

Wie bereits angedeutet, ist für die Umsetzung der Multi-UAV-Führung durch einen Operateur der massive Einsatz von Automation notwendig. Sie erst ermöglicht es dem Operateur seine UAV-Führungsaufgabe durchzuführen. Hierbei übernimmt die Automation letztlich Aufgaben, die in

konventionellen Anordnungen noch vom Menschen durchgeführt werden. [Wickens, 1992] sieht diese Substitution überhaupt als Charakteristikum von Automation an:

„... a device or a system that accomplishes (partially or fully) a function that was previously carried out (partially or fully) by a human operator.“

Diese Definition sagt jedoch noch nichts über die Art der Aufgabe bzw. Funktionalität, die die Automation übernimmt. Das Funktionalitätsspektrum, das sich hinter dem Begriff der Automation verbirgt, kann prinzipiell sehr weitreichend gefasst sein, angefangen von einem einfachen, technischen Gerät, das für sich betrachtet isolierte Aufgaben/Funktionen ausführt, bis hin zu einem intelligenten Expertensystem, das über eigene Entscheidungsfähigkeiten verfügt.

Generelle Ziele, die dabei mit dem Einsatz von Automation verfolgt werden sollen, sind:

- Die operationellen Fähigkeiten des Menschen zu erweitern, so dass dieser auch Aufgaben durchführen kann, für die er aufgrund seiner natürlichen Fähigkeiten nicht oder nur bedingt geeignet wäre (*Effektivitätssteigerung*).
- Die Belastung und Beanspruchung von Operateuren zu senken, um mögliche Überforderungssituationen sowie Ermüdungseffekte zu vermeiden. Aber auch die Entlastung der Operateure von monotonen Routineaufgaben, um so Leistungsverlechterungen des Menschen, hervorgerufen beispielsweise durch Unterforderung oder Vigilanzverlust entgegen zu wirken (*Risikominimierung*).
- Die Reduzierung notwendigen Personals zur Durchführung der Aufgabe (*Kostenminimierung*).

Die Vergangenheit zeigt jedoch, dass diese grundlegenden Ziele der Nutzung von Automation nicht immer vollständig oder so wie erwartet erreicht werden können. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Sie stehen jedoch oft in Zusammenhang mit der Realisierung der einzelnen Automationsfunktionalitäten an sich, aber auch in dem Einbringen von Automation in das Mensch-Maschine-System. So sieht [Wickens u. a., 1997] eine Ursache bereits bei der Umsetzung von Automationsfunktionalitäten, bei der in erster Linie Aspekte der Machbarkeit von Hard- und Softwaresystemen berücksichtigt werden, jedoch nicht oder nur bedingt die zu erwartende Interaktion dieser Funktionalitäten mit dem Benutzer.

[Sarter u. a., 1997] und [Christoffersen und Woods, 2002] sehen eine weitere Schwachstelle im Vorgehen bei der Automatisierung. Mit dem Begriff der „*Substitutions-Mythen*“ beschreiben sie die bereits fehlerhafte Annahme der Systemdesigner, dass Teilaufgaben des Operators ohne Rückwirkung auf das gesamte (Mensch-Maschine-) System durch Automation zu ersetzen sind. Unberücksichtigt dabei bleibt, dass Aufgaben voneinander abhängig und insbesondere in komplexen Systemen gekoppelt sind.

[Billings, 1997] beschreibt mit seiner Automationskritik bestimmte Eigenschaften von Automation, sowie die damit verbundenen Konsequenzen für Operateure. Die wesentlichen Kritikpunkte werden dabei mit den folgenden Begrifflichkeiten beschrieben:

- *literalism* - Die Automation führt exakt die vom Operateur vorgegebenen Anweisungen aus, ohne mögliche Konflikte mit dem Situationskontext zu berücksichtigen.
- *opacity* - Die Automation erklärt sich bzw. ihre Aktionen nicht oder nur unzureichend. Der menschliche Operateur muss mit Hilfe seines mentalen Modells über die Automationsfunktion eine Erklärung für das beobachtbare Verhalten finden.
- *complexity* - Der Operateur verfügt aufgrund der Systemkomplexität über kein vollständiges, mentales Modell des Systems und ist daher nicht mehr in der Lage alle Verhaltensweisen des Systems nachvollziehen und vorhersagen zu können.

- *overreliance* - Ein durch den Operateur geäußertes übermäßiges, „blindes“ Vertrauen in die Automation führt langfristig zu einer reduzierten Überwachung des Systems durch den Operateur und damit verbunden zu dem Übersehen von Fehlern der Automation.
- *brittleness* - Das Verhalten der Automation außerhalb ihrer im Design festgelegten Betriebsgrenzen ist undefiniert oder falsch.

Einen weiteren Grund für das nur bedingte Erreichen der Zielvorstellungen des Automatisierungsansatzes sieht [Parasuraman u. a., 1992] in der durch die Automation hervorgerufene, geänderte Verteilung von Aufgaben und Autorität zwischen Mensch und Maschine. So führt die steigende Automatisierung in komplexen Systemen zu einer „*Peripherisierung*“ des menschlichen Operators. Ein Begriff der nach [Scerbo, 2006] die Wandlung eines ehemals aktiven Teilnehmers hin zu einem mehr und mehr passiven Teilnehmer beschreibt. [Sarter u. a., 1997] spricht in diesem Zusammenhang von einer durch die Automation hervorgerufenen geänderten Rolle des Operators:

„The introduction of new automation has shifted the human role to one of monitor, exception handler, and manager of automated resources.“

Nach [Sherry und Ritter, 2002] führt diese modifizierte Rolle zu einer geänderten Lastverteilung über die Zeit, aber auch zu neuen Anforderungen an den menschlichen Operateur. Diese neuen Anforderungen sind ein Resultat der geänderten Aufgabe des Operators, die im Wesentlichen nun eine „*supervisory-control*“-Aufgabe [Sheridan, 1992] darstellt. Sie führt dazu, dass der Mensch nun, je nach Komplexität des Systems, mit einer Vielzahl an automatisierten Funktionalitäten konfrontiert wird. Diese Aufgabenform fordert neben dem reinen Überwachen und Diagnostizieren auch das situationsangepasste Eingreifen des Operators. Es handelt sich hierbei um eine Aufgabe, die sich insbesondere auch in der Multi-UAV-Führung wiederfindet.

Diese geänderte Aufgabenform und -verteilung zwischen Mensch und Automation bedingt jedoch eine Reihe an neuartigen und ungewollten Problemen. So resultiert die dem Menschen zugewiesene überwiegend passive und überwachende Rolle in typischen Phänomenen der Unterforderung, die sich in *Langweile*, sowie *Vigilanzverlusten* äußern [Parasuraman u. a., 1992]. Diametral dazu steht die mögliche *Informationsüberflutung* [Drury und Scott, 2008] bedingt durch die Überwachung einer Vielzahl an automatisierten Systemen, ebenso wie ein *Verlust des System- und Situationsbewusstseins* [Manning u. a., 2004]. Ferner bemerken [Mackworth, 1950] und [Bainbridge, 1983], dass der Mensch für länger andauernde Überwachungsaufgaben scheinbar nur bedingt geeignet ist:

„We know from many ‘vigilance’ studies that it is impossible for even a highly motivated human being to maintain effective visual attention towards a source of information on which very little happens, for more than about half an hour. This means that it is humanly impossible to carry out the basic function of monitoring for unlikely abnormalities. . . “ [Mackworth, 1950]

„The human monitor has been given an impossible task.“ [Bainbridge, 1983]

Um diesen nun überwiegend *automationsbedingten Problemen* entgegenzuwirken wird widersinniger Weise ein Ansatz verfolgt, diesen durch Hinzufügen weiterer Automation zu entgegnen. Hierbei handelt es sich um einen *reaktiven Automationsansatz*. Nach [Onken und Schulte, 2010] wird hierbei ein *Teufelskreis der Automation* (vgl. Abbildung 1.4) durchlaufen. So führt das Hinzufügen zusätzlicher Automation zu einem weiteren Anstieg der Komplexität des Systems. Die im Rahmen der supervisory-control auftretenden Probleme werden weiter verstärkt. Ein System dieser Art, das letztendlich von einem Menschen überwacht, bedient und gesteuert werden muss, wird mit hoher Wahrscheinlichkeit erneut in Fehlern des Menschen im Umgang mit diesem System resultieren.

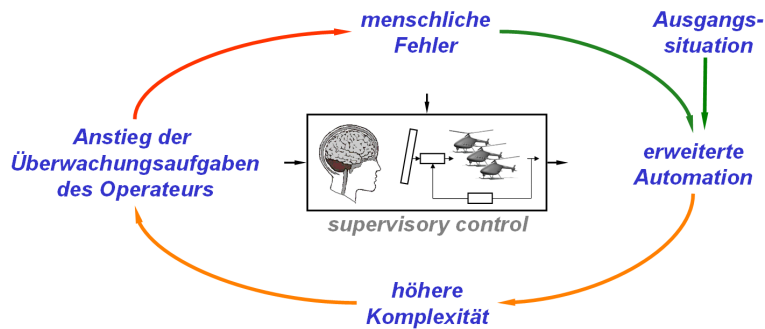


Abbildung 1.4: Teufelskreis der Automation [Onken und Schulte, 2010]

1.2 Assistenzsysteme - eine Lösungsalternative

Wie sich anhand des „*Teufelskreises der Automation*“ anschaulich zeigt, kann das Auftreten von Fehlern in komplex automatisierten Systemen nicht grundsätzlich durch Hinzufügen weiterer Automation verhindert werden. Vielmehr kann die Automation zu einem nicht unerheblichen Teil selbst zu der Entstehung von Fehlern beitragen dadurch, dass in bestimmten Situationen, entgegen ihrer ursprünglichen Intention, Automation sogar zu einer erhöhten Beanspruchung beim Operator führt („*clumsy automation*“ [Wiener, 1989]).

Es stellt sich folglich die Frage, welche Möglichkeiten existieren, um aus diesem *Teufelskreis der Automation* und den damit verbundenen Problemen konventioneller Automation auszubrechen, um so die ursprünglichen Ziele des Automationseinsatzes, wie beispielsweise Fehlerreduzierung, Erweiterung der Fähigkeiten und Reduzierung der Operatorbeanspruchung bestmöglich zu erreichen.

Das *Institut für Flugsysteme* verfolgt in diesem Zusammenhang seit vielen Jahren den Ansatz der so genannten *wissensbasierten Assistenzsysteme*. Hierbei handelt es sich um eine Art der Automation, die den Menschen und das Zusammenwirken von Mensch und Automation, im Sinne der „*human-centered*“ Automation [Billings, 1997], besonders betrachtet. Diese Automationsphilosophie hat dabei im Gegensatz zu *konventioneller* Automation, nicht das Ziel Aufgaben des Menschen zu substituieren. Vielmehr arbeitet sie parallel und unterstützend zum Menschen und gemeinschaftlich an der Zielerreichung. Neben diesem neuen Ansatz der Automatisierung ist auch die hierbei verwendete Automation (*kognitive Automation* [Onken und Schulte, 2010]), deutlich unterschiedlich zur konventionellen Automation. So verfügt *kognitive Automation* über Fähigkeiten, die sich an den menschlichen Kognition orientieren. Damit ist es dieser Automationsform beispielsweise möglich, ähnlich wie ein Mensch, die umgebende Situation vor dem Hintergrund übergeordneter Handlungsziele zu interpretieren und partnerschaftlich und gemeinsam mit dem Menschen an der Erreichung eines übergeordneten Arbeitsziels (z.B. einem Missionsziel) zu arbeiten. Infolge dieser neuartigen Eigenschaften der Automation, besitzt kognitive Automation die Möglichkeit typischen Mängeln der konventionellen Automation, wie *literalism*, *opacity* und *brittleness*, entgegen zu wirken [Meitinger, 2008].

Die Erweiterung kognitiver Automation um zusätzliche *kooperative Fähigkeiten*, d.h. um Fähigkeiten mit einem Menschen interagieren, kooperieren und ihn im Rahmen seiner eigenen Fähigkeiten unterstützen zu können, führt zu einer Automationsform, die die Bezeichnung *Assistenzsystem* trägt. Sie verspricht es aus dem zuvor beschriebenen *Teufelskreis der Automation* auszubrechen, wie es in Abbildung 1.5 schematisch dargestellt ist.

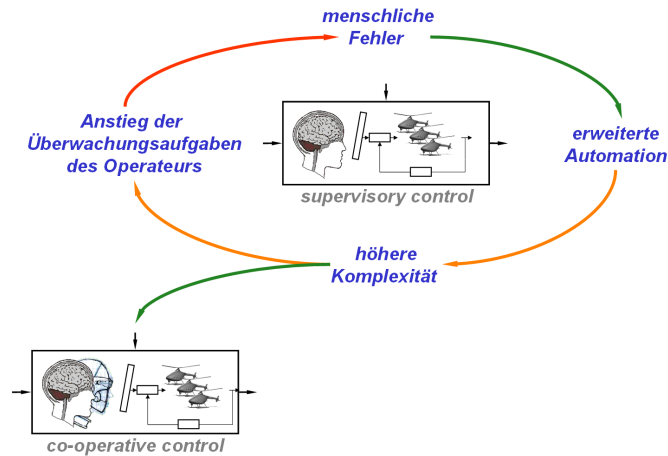


Abbildung 1.5: Assistenzsysteme als Ausweg aus dem Teufelskreis

Dabei wirkt die *kognitive Automation* den typischen Mängeln konventioneller Automation entgegen, während der *kooperative* Ansatz hilft Probleme im Bereich der Überwachung der Automation zu verringern, und kritische Situationen des Operators durch Anbieten von entsprechenden Lösungsvorschlägen, oder Aufgabenabnahme zu entschärfen. Dieser Ansatz wird im weiteren Verlauf der Arbeit (vgl. Kapitel 2) noch detaillierter erläutert.

1.3 Forschungsfragestellung der Arbeit

Aufgabe der Assistenzsysteme ist es, den Menschen in der Erreichung seiner Ziele wie beispielsweise der Missionserfüllung zu unterstützen. Dabei soll die Unterstützung nicht pauschal und aufdringlich erfolgen, sondern vielmehr am tatsächlichen Bedarf des Menschen orientiert sein. Nach [Onken und Schulte, 2010] ist dieser Bedarf beispielsweise in Situationen gegeben, in den der Operator an einer anderen als der gegenwärtig dringlichsten Aufgabe arbeitet, aber auch in Situationen in den der Operator infolge seiner Aufgabenbearbeitung überfordert ist. Beide Situationen können ohne eine gezielte Unterstützung eine negative Auswirkung auf die Zielerreichung darstellen. Während eine falsche Aufmerksamkeitsverteilung des Operators dazu führen kann, dass notwendige, situationsbedingte Aktionen oder Handlungsschritte vom Operator übersehen werden, stellt die Überforderung des Menschen einen Zustand dar, in dem es ihm längerfristig nicht mehr gelingt seine Leistung aufrecht zu erhalten.

Damit ein Assistenzsystem in diesen Situationen unterstützend eingreifen kann, muss es diese *maschinell* erkennen können. Dabei stellt insbesondere die Erkennung der Überforderung eines Menschen eine Herausforderung dar. So ist die Überforderung Teil der vom Menschen subjektiv empfundenen Beanspruchung, die sich einer direkten messtechnischen Erfassung entzieht. Ferner ist auch die Begriffswelt von Überforderung und hoher Beanspruchung nicht klar abgegrenzt, so dass auch hier eindeutige Anhaltspunkte für diesen Zustand fehlen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, sich dieser Problematik, der Erfassung von Überforderungssituationen, experimentell zu nähern. Übertragen in den Kontext der Multi-UAV-Führung lässt sich die Kernfragestellung der Arbeit wie folgt konkretisieren:

Wie lassen sich Überforderungssituationen von UAV-Operateuren im Kontext der Multi-UAV-Führung erkennen, um so operateuradaptive Fähigkeiten zukünftiger Assistenzsysteme zu verbessern?

Als Grundlage für die Erkennung von Überforderung wird in dieser Arbeit die Beobachtung des Operateurverhaltens, also die Interaktionen des Operators mit dem System in bestimmten Aufgabensituationen gewählt. So ändert sich das Operateurverhalten in hohen Beanspruchungssituationen. Ursächlich für diese Änderung des Verhaltens, ist die Anpassung der Operateure an die aktuelle Belastungs- und Beanspruchungssituation durch Verwendung *selbstadaptiver Strategien* [Sperandio, 1971] [Sperandio, 1978]. Sie stellen einen Selbstregulationsmechanismus des Operators dar, mit dem Ziel die Beanspruchung auf einem für sie handhabbaren Niveau zu halten und das Auftreten von Leistungsverlusten, durch das Erreichen eigener Kapazitätsgrenzen, möglichst lange hinauszuzögern. Des Weiteren stellt das Verhalten eine Größe dar, die sich im Gegensatz zur subjektiv empfundenen Beanspruchung, kontinuierlich und objektiv erfassen lässt. Als Parameter für die Erfassung des Verhaltens sollen im Verlauf der Arbeit die manuellen und visuellen Interaktionen des Operators im Umgang mit dem System während der Bearbeitung seiner Aufgaben herangezogen werden.

Da der hier postulierte Selbstregulationsmechanismus vom Menschen angewendet wird, noch bevor es zu einer deutlichen Verschlechterung seiner Leistung, oder gar dem Auftreten von gravierenden Fehlern kommt, soll dieser Ansatz im Hinblick auf eine Erfassung von Überforderung des Menschen näher untersucht werden.

Wenn es gelingt, das **Operateurverhalten**, sowie **geändertes Operateurverhalten** infolge der Anwendung **selbstadaptiver Strategien** in entsprechende **Rechnermodelle** (Operateurverhaltensmodelle) umzusetzen, könnten damit zukünftige **Assistenzsysteme proaktiv**, d.h. vor dem Auftreten von Fehlern, entsprechend **unterstützend eingreifen**.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen also diese beanspruchungsbedingten Verhaltensänderungen im Kontext der Multi-UAV-Führung experimentell untersucht werden. Betrachtet wird hierzu die Führung von einem bzw. mehreren UAVs durch den Kommandanten eines Hubschraubers. Dieser hat die Aufgabe, die UAVs als abgesetzte Sensorplattformen für zeitnahe Aufklärungsaufgaben zu verwenden. Die Beobachtung des Verhaltens der UAV-Operateure erfolgt dabei im Rahmen von umfassenden Simulatorexperimenten. Hierbei wird das Verhalten (manuelle und visuelle Interaktionen) der Operateure im Umgang mit ihrem UAV-Operateurarbeitsplatz erfasst, dokumentiert und analysiert. Diese stellen die Grundlage für weitere modellierungstechnische Betrachtungen des Operateurverhaltens dar. Ergänzend wird ein Ansatz für die Modellierung von Operateurverhalten wie auch seiner beanspruchungsbedingten Änderungen aufgezeigt. Dieser erlaubt es das Verhalten der Operateure in entsprechende Rechnermodelle zu kapseln und somit einem Assistenzsystem zur Verfügung zu stellen. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf der Messung und Analyse von Verhaltensweisen, sowie der Ausarbeitung möglicher Ansätze für eine Modellbildung, nicht jedoch in der applikationsreifen Modellbildung an sich. Vielmehr gilt es auszuloten, inwiefern sich der verhaltensbasierte Ansatz eignet, um zukünftig die operateuradaptiven Fähigkeiten zu steigern.

1.4 Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Ansatz zur Weiterentwicklung wissensbasierter Assistenzsysteme verfolgt. Dafür wird in Kapitel 2 zunächst der Begriff des Assistenzsystems und seine Einbettung in das Arbeitssystem umfassend betrachtet. Aufbauend auf diesen Betrachtungen werden die grundlegenden Anforderungen eines Assistenzsystems abgeleitet und entsprechende Charakteristika von Assistenzsystemen identifiziert. Ferner spielt in diesem Umfeld der Begriff der adaptiven Automation und seiner Kernfragestellungen eine bedeutende Rolle. Verschiedene Fallstudien von Assistenzsystemen und ihrer adaptiven Eigenschaften in der Luftfahrt schließen diese Darstellung ab.

Offensichtlich spielen bei all diesen adaptiven Ansätzen die Begriffe der Überforderung und damit verbunden der Operateurbeanspruchung, eine besondere Rolle. Daher wird in Kapitel 3 zunächst auf die Begrifflichkeiten Überforderung, Belastung, Beanspruchung und Leistung, sowie auf Zu-

sammenhänge zwischen diesen Konzepten eingegangen. Des Weiteren werden Möglichkeiten zur Bestimmung der Beanspruchung aus der Literatur dargestellt und in einen systematischen Zusammenhang gebracht, welcher dieser Arbeit dienlich ist.

Gegenstand dieser Arbeit ist es, eine dieser Methoden aufzugreifen und weiter zu entwickeln. Hierfür scheint der verhaltensbasierte Ansatz infolge der Selbstadaption des Menschen besonders viel versprechend. Kapitel 4 definiert daher zunächst den Begriff des Operateurverhaltens und diskutiert die unterschiedlichen Erscheinungs- und Ausprägungsformen selbstadaptiver Strategien. Ferner widmet sich dieses Kapitel der Darstellung eines entsprechenden Konzeptansatzes, der es zukünftigen Assistenzsystemen ermöglichen soll, sowohl die gegenwärtige Aufgabensituation, als auch kritische Beanspruchungssituationen des Operators zu erkennen. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einem experimentellen Ansatz zur Gewinnung notwendiger Verhaltensmodelle.

Um den hier gewählten Ansatz, ebenso wie die damit verbundene Hypothese der Verhaltensänderung von Operateuren in kritischen Beanspruchungssituationen zu verifizieren, wird in Kapitel 5 die experimentelle Realisierung zur Modelldatengewinnung dargelegt. Dabei werden neben dem Operateurverhalten zusätzliche, abhängige Variablen erfasst, um so das beobachtete Verhalten in den aktuellen Belastungs- und Beanspruchungskontext einordnen zu können. Zur Identifizierung von gleichem, wie auch veränderten Verhalten wird hier auf die semantische Betrachtung von Verhalten eingegangen, die es erlaubt Verhalten, sowie Änderungen des Verhaltens, auf einem abstrakteren, symbolischen Niveau, zu analysieren.

Kapitel 6 dokumentiert die Ergebnisse der durchgeführten Experimentalkampagne. Im Vordergrund der Betrachtungen stehen dabei die Auswirkungen der in den Experimenten durchgeführten Belastungssteigerung auf die Größen Beanspruchung, Leistung und Verhalten. Leistung und Verhalten werden dabei mittels einer gezielt eingeführten Nebenaufgabe (Indikatoraufgabe) qualitativ wie auch quantitativ analysiert.

Ausgehend von einer Analyse des beobachteten Operateurverhaltens werden in Kapitel 7 Hidden Markov Modelle als Ansatz für die Modellierung von Operateurverhalten vorgestellt. Hierbei erfolgt zunächst eine Betrachtung des zu Grunde liegenden Verfahrens, sowie die für eine Modellierung erforderliche Aufbereitung der Experimentaldaten. Die Anwendung des Verfahrens und die dabei gewonnen Ergebnisse geben dabei einen ersten Einblick in das Potential der Methode für zukünftige Anwendungen.

Kapitel 8 bietet abschließend eine zusammenfassende Darstellung der Arbeit und einen Ausblick über weitere Anknüpfungspunkte für zukünftige Arbeiten auf diesem Gebiet.

Kapitel 2

Assistenzsysteme

Assistenzsysteme sollen den Menschen in seiner Aufgabenerfüllung unterstützen und dabei den Problemen konventioneller Automatisierung entgegen wirken. Um diese übergeordnet formulierten Zielsetzungen zu erreichen, ergeben sich eine Reihe an Anforderungen an Assistenzsysteme. Sie werden unter Verwendung des Theorieansatzes „Arbeitssystem“ abgeleitet (Kapitel 2.1). Dabei bietet das Arbeitssystem die Möglichkeit nicht nur einzelne Automationsfunktionalitäten an sich, sondern vielmehr das Zusammenwirken zwischen Mensch und Automation vor dem Hintergrund der Erreichung des Arbeitsziels, sowie unter Einbeziehung verschiedener Randbedingungen zu betrachten.

Da Assistenzsysteme den Menschen in Abhängigkeit von seinem tatsächlichen Bedarf unterstützen sollen, spielt hier der Begriff der adaptiven Automation eine wichtige Rolle. Dieser findet sich implizit in den Grundforderungen an Assistenzsysteme und wird daher in Kapitel 2.2 vertieft betrachtet. Komplettiert wird dieses Kapitel mit der Darstellung verschiedener, luftfahrttechnisch relevanter, forschungsorientierter Umsetzungen von Assistenzsystemen und ihren adaptiven Fähigkeiten (Kapitel 2.3)

2.1 Theorie der Assistenzsysteme

Um den Defiziten konventioneller Automation und den Problemen der Interaktionen menschlicher Operateure in komplex automatisierten Systemen entgegen zu wirken, wird ein kooperativer Ansatz des Zusammenwirkens von Mensch und Automation verfolgt. Diese Art von Automation wird im Folgenden als *Assistenzsystem* bezeichnet und im Rahmen dieses Kapitels näher untersucht. Grundlage für die Umsetzung dieses Ansatzes stellt das Paradigma der *kognitiven Automation* dar. Hierbei handelt es sich um eine Art der Informationsverarbeitung in automatisierten Systemen, die sich in ihren Fähigkeiten an menschlicher Kognition orientiert. Die Einbettung von *kognitiver Automation* in Mensch-Maschine-Systeme erfolgt unter Verwendung von künstlich kognitiven Einheiten, so genannten *ACUs* (*Artificial Cognitive Unit*) [Onken und Schulte, 2010]. Hierfür existieren verschiedene Möglichkeiten. Diese werden im Folgenden anhand des Arbeitssystems diskutiert. Das Arbeitssystem bietet dabei ein Rahmenwerk, das eine ganzheitliche Betrachtung ausgehend von einem übergeordneten Arbeitsziel, und nicht nur einzelner automatisierter Funktionalitäten ermöglicht.

2.1.1 Einbettung des Assistenzsystems in ein Arbeitssystem

Der Begriff des Arbeitssystems (siehe Abbildung 2.1), lässt sich ursprünglich auf [REFA, 1984] zurückführen und wurde durch [Onken, 2002] [Onken und Schulte, 2010] im Hinblick auf die Definition des Begriffs des Assistenzsystems präzisiert. Es dient der Beschreibung des Zusammenwirkens von Mensch und Maschine vor dem Hintergrund einer definierten Arbeitsaufgabe (Arbeitsziel). Diese(s) stellt die wesentliche Vorgabe für das Arbeitssystem beziehungsweise den zu betrachtenden Arbeitsprozess dar. Das Arbeitsziel wird in Form einer Anweisung, eines Auftrages, eines Befehls entweder von einer anderen leitenden Organisation an das Arbeitssystem weitergegeben, oder kann vom menschlichen Operateur selbst generiert werden. Einschränkende Faktoren des Arbeitsprozesses sind die Umgebungsbedingungen, einschließlich der zur Verfügung stehenden Informationen und Ressourcen. Der Ausgang des Arbeitssystems umfasst den gegenwärtigen Zustand des Systems, sowie ein endgültiges Ergebnis, das in Folge des Arbeitsprozesses erreicht wurde. Das Arbeitssystem enthält zwei grundlegende Komponenten, die *Operating Force* (d.h. den Bediener) und die *Operation Supporting Means* (d.h. die technischen Hilfsmittel).

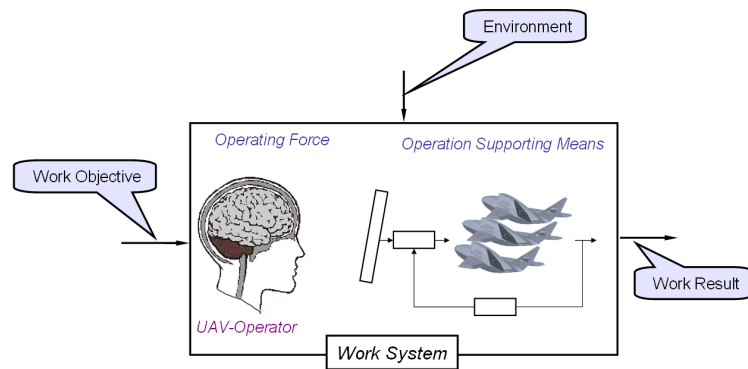


Abbildung 2.1: Das Arbeitssystem

Die *Operating Force* besteht dabei typischerweise aus mindestens einem menschlichen Operateur oder aber einem (menschlichen) Team. Sie stellt im Arbeitssystem die höchste und letztendliche Entscheidungsinstanz dar [Onken und Schulte, 2010]. Dabei ist sie die einzige Komponente, die das Arbeitsziel kennt, versteht und verfolgt. Im Sinne der Zielerreichung bestimmt und überwacht sie den eigentlichen Arbeitsprozess und koordiniert hierfür den Einsatz und die Verwendung der *Operation Supporting Means*. Im Arbeitssystem besitzt die *Operating Force* die höchste Autoritätsstufe, wodurch es ihr als einzige möglich ist, sich selbst ein Arbeitsziel vorzugeben, oder aber ein bestehendes Arbeitsziel zu verändern. Durch diese Fähigkeit der *Operating Force* wird das Arbeitssystem zu einem autonomen, d.h. zu einem selbst bestimmten System [Donath und Schulte, 2006] [Onken und Schulte, 2010].

Die *Operation Supporting Means* (OSM) repräsentieren im Wesentlichen die zur Verfügung stehende, meist technische Ausrüstung. In der hier betrachteten Domäne der Flug- und Multi-UAV-Führung umfassen die *Operation Supporting Means* das in der Regel mehr oder minder automatisierte Luftfahrzeug, wie auch die zu führenden UAVs. Charakteristisch für die *Operation Supporting Means* ist, dass sie lediglich einzelne Teilaufgaben im Rahmen der durch die *Operating Force* betriebenen Erreichung des Arbeitsziels übernehmen.

Um den menschlichen Operateur nun im Rahmen seiner Aufgabendurchführung zu unterstützen, wird das bisherige Arbeitssystem um die Integration von *kognitiver Automation* in Form von *künstlich kognitiven Einheiten (ACUs)* erweitert. Derartige ACUs verfügen über Fähigkeiten die sich an den Informationsverarbeitungsprozess des Menschen [Rasmussen, 1983] anlehnen. Durch diese Fähigkeiten ist es ihnen möglich, in Abhängigkeit von ihrem zur Verfügung stehenden *a-priori Wissen* und ihrer Anbindung an die umgebende Welt ein Verständnis der umgebenden Situation aufzubauen, mögliche Konflikte mit aktuell vorherrschenden Zielen zu identifizieren, Lösungsalternativen zu entwickeln und je nach zugewiesener Autorität (Automationsgrad) einzelne Aufgaben oder Funktionen durch Ansteuerung zur Verfügung stehender technischer Hilfsmittel auszuführen. Dies befähigt eine ACU im Sinne der Rationalität menschenähnlich und damit nachvollziehbar zu agieren.

Welche Anforderungen dabei an ihr System-/Umgebungsverständnis zu stellen sind, bzw. welche Ziele sie dabei in Betracht ziehen soll und wie das Spektrum ihrer Handlungsalternativen zu sein hat, hängt dabei im Wesentlichen von ihrer Rolle ab, die sie im Arbeitssystem wahrnehmen soll. Besteht die Aufgabe der ACU darin, ausschließlich Teilaufgaben des Menschen unter Einbeziehung der verfügbaren OSMs zu übernehmen [Meitinger, 2008] [Uhrmann u. a., 2010b], so findet sich diese ACU auf Seiten der *Operation Supporting Means* im Arbeitssystem. Diese Integration kognitiver Automation auf Seiten der technischen Hilfsmittel (Abbildung 2.2, rechts) wird als *Supporting ACU (SCU)* bezeichnet.

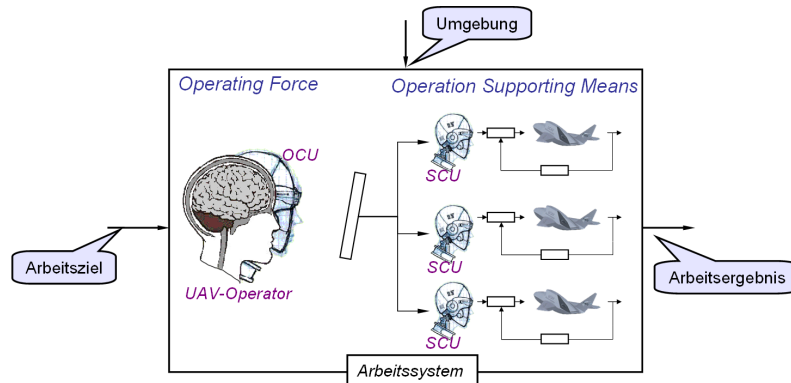


Abbildung 2.2: Einführung von OCU und SCU in ein Arbeitssystem

Wird hingegen der *ACU* die Aufgabe übertragen mit dem Menschen zu kooperieren, so benötigt diese Art der *ACU* über die kognitiven Fähigkeiten hinaus zusätzliche kooperative Fähigkeiten, die es ihr ermöglichen diese Anforderung umsetzen zu können. In diesem Fall findet sich die *ACU* im Arbeitssystem auf Seiten der *Operating Force* (Abbildung 2.2, links). Für die Realisierung dieser Kooperation muss die *ACU* ebenso wie der Mensch das übergeordnete Arbeitsziel kennen, verstehen und Rahmen seiner zur Verfügung stehenden Möglichkeiten parallel zum Menschen verfolgen können.

Verfügt eine *ACU* über die hier genannten Fähigkeiten, wird sie als Assistenzsystem (*Operating ACU, OCU*) bezeichnet. Eine *Operating ACU*, die derart mit einem Menschen gemeinsam und kooperativ an der Erreichung des Arbeitsziels arbeitet, erreicht nach [Onken, 2002] damit eine Hierarchiestellung in einem Arbeitssystem, die bisher ausschließlich dem Menschen vorbehalten war.

Durch die Unterstützung des menschlichen Operators in seiner Aufgabenerfüllung erreicht die *OCU* nach [Malin und Schreckenghost, 1992] nicht nur eine neu gewonnene Hierarchiestellung, sondern wird ferner Teil eines Teams, hier bestehend aus Mensch und *OCU*:

„Intelligent systems that effectively support human operators in performing their tasks, making these systems a part of the team.“

2.1.2 Anforderungen an ein Assistenzsystem als elektronisches Teammitglied

Nach [Salas u. a., 1992] definiert sich der Begriff des Teams als:

„... a distinguishable set of two or more people who interact dynamically, interdependently, and adaptively toward a common and valued goal/objective/mission, who have been assigned specific roles or functions to perform and who have a limited life-span of team membership.“

Gemäß dieser Definition arbeiten die einzelnen Teammitglieder abhängig voneinander, adaptiv im Rahmen ihrer spezifischen Fähigkeiten oder zugewiesenen Rollen an der Erfüllung eines gemeinsamen Ziels. Vergleicht man diese ursprünglich für Menschen aufgestellte Teamdefinition mit den von [Onken und Schulte, 2010] postulierten Anforderungen notwendiger Eigenschaften von Assistenzsystemen, so zeigen sich hier deutliche Übereinstimmungen. So muss ein Assistenzsystem nach [Onken und Schulte, 2010]

- das gleiche Arbeitsziel wie der Mensch verfolgen,
- sich ein eigenes Abbild der Situation erstellen,
- für die Bearbeitung der Aufgaben die zur Verfügung stehenden OSMs nutzen und
- mit dem Menschen kooperieren können.

Damit ist für eine Zusammenarbeit in einem menschlichen Team, aber auch zwischen Mensch und Assistenzsystem, das *gemeinsame (Arbeits-)Ziel* entscheidend.

Die weiteren Anforderungen, sich ein Abbild der Situation erstellen zu können, zur Verfügung stehende OSMs für die Umsetzung der Aufgaben zu nutzen, sowie mit dem menschlichen Teammitglied zu kooperieren, ergeben sich in erster Linie daraus, dass es sich bei Assistenzsystemen um Software-Agenten handelt, aber auch aus ihrer Integration im Arbeitssystem auf Seiten der *Operating Force*, die insbesondere die kooperativen Aspekte bedingen.

Als Software-Agenten benötigen Assistenzsysteme daher für die Umsetzung dieser geforderten Fähigkeiten ein im Vergleich zum Menschen entsprechendes Wissen. Dieses ist die Grundvoraussetzung für Assistenzsysteme um Situationen interpretieren, das Arbeitsziel verstehen und mit verfügbaren OSMs, sowie dem Menschen interagieren zu können (vgl. Abbildung 2.3). Die hierfür notwendigen Wissensbereiche werden im Folgenden exemplarisch betrachtet:

- *Wissen über das Arbeitsziel*
Um ein Arbeitsziel parallel zum Menschen verfolgen und an seiner Erreichung arbeiten zu können, benötigt ein Assistenzsystem Wissen über das zu erreichende Arbeitsziel, die damit verbundenen Aufgaben, die möglichen Aktionssequenzen zur Erreichung des Arbeitsziels, sowie über Randbedingungen, die Rahmen der Zielerreichung einzuhalten sind. Diese können beispielsweise Priorisierungsmaßnahmen einzelner Aufgaben, oder einzuhaltende zeitliche und örtliche Randbedingungen umfassen. Ferner benötigt das Assistenzsystem für den Fall auftretender Zielerreichungskonflikte Wissen darüber, wie diese (im Sinne von „*Rules of Engagement*“) zu behandeln sind.
- *Wissen über die aktuelle (umgebende) Situation*
Für die Generierung eines möglichst umfassenden Situationsabbildes muss ein Assistenzsystem in der Lage sein, seine umgebende Situation sowohl zu erkennen, als auch ihre aktuelle Bedeutung verstehen zu können. [Brezillon und Pomerol, 1999] sprechen in diesem Fall von einer kognitiven Repräsentation der Umwelt. Der Erkennungsprozess setzt dabei zunächst

einmal Wissen über die verschiedenen möglichen Situationsfragmente voraus, so beispielsweise Wissen über die Mission, die taktische Lage, Objekte, Hindernisse, Wetter, Lufträume und Position weiterer beteiligter Luftraumteilnehmer. Das Verstehen einer Situation fordert zudem Wissen die einzelnen Situationsfragmente unter Berücksichtigung aktueller Zielvorstellungen folgerichtig interpretieren zu können.

- *Wissen über die zur Verfügung stehenden technischen Hilfsmittel*

Um als Software-Agent aktiv eingreifen und den Menschen unterstützen zu können, benötigt das Assistenzsystem ferner Wissen über die zur Verfügung stehenden *OSMs* (z.B. UAVs, Sensorik, Interaktionsmöglichkeiten mit dem Autopiloten, Medien zur Interaktion mit dem Operateur). Dies umfasst die Fähigkeiten, Einsatzbereiche und Limitationen dieser *OSMs*, aber auch Wissen um die Autorität des Assistenzsystems bezüglich des Einsatzes der *OSMs*. Dieses Wissen schließt idealerweise auch das Wissen über die eigenen Fähigkeiten und Limitationen mit ein.

- *Wissen über den menschlichen Operateur*

Essentiell vor dem Hintergrund der Realisierung des Teamaspekts ist das Wissen über den menschlichen Operateur. Nach [Hoc und Lemoine, 1998], [Christoffersen und Woods, 2002] und [Schmidt, 2008] bedarf es für eine grundlegende Zusammenarbeit mit dem Menschen zunächst einmal eines gemeinsamen Verständnisses der gegenwärtigen Situation. Dieses wird als „*shared situational understanding*“ bezeichnet. Die Kooperation erfordert jedoch noch weiteres Wissen. Dieses spezifische Wissen über den menschlichen Operateur umfasst beispielsweise Wissen über seine Fähigkeiten, Limitationen, seine aktuell verfügbaren Ressourcen, seine Beanspruchung, seine gegenwärtig verfolgten Absichten, sowie den vom Operateur benötigten Informationsbedarf in der gegenwärtigen Situation [Vanderhagen u. a., 1994].

Das Wissen sowie dessen Erwerb und Repräsentation wird dabei oft als „*Flaschenhals*“ wissensbasierter Systeme [Schmalhofer u. a., 1991] angesehen. So muss zunächst einmal identifiziert werden, welches Wissen für ein derartiges System benötigt wird, aber auch, wie sich dieses Wissen, insbesondere bei *implizitem* und *prozeduralem* Wissen, extrahieren lässt.

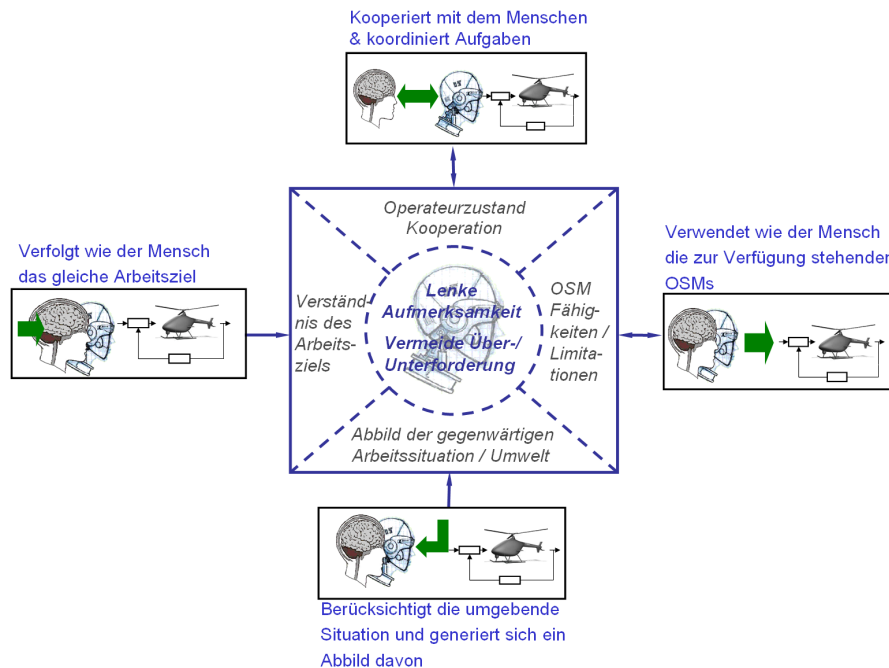


Abbildung 2.3: Erforderliche Wissensgebiete eines Assistenzsystems ([Donath u. a., 2010])

Die Fähigkeiten eines Assistenzsystems hängen jedoch nicht nur vom hinterlegten Wissen ab, sondern zudem von seiner Anbindung an die Umgebung (Sensoren und Effektoren), sowie von seiner Autorität.

Anbindung an die Umwelt (Sensoren/Effektoren):

Als Software-Agent ist ein Assistenzsystem auf eine sensorische wie auch effektorische Anbindung an die Umwelt angewiesen. Die sensorische Anbindung ermöglicht es einem Assistenzsystem erst, Informationen aus der Umwelt für eine nachfolgende Situationsinterpretation zu erfassen. Ist die sensorische Anbindung, oder aber das Wissen zur Verarbeitung dieser sensorischen Information eingeschränkt, limitiert sich dadurch das Situationsbild der OCU. Neben Sensoren benötigt ein Assistenzsystem entsprechende Effektoren in Form von OSMs (z.B. Displays, Automationsfunktionalitäten wie FMS und Autopiloten), die es einer OCU erst ermöglichen mit dem Operateur zu kooperieren und ihm Aufgaben bzw. Teilaufgaben durch gezieltes Ansteuern verfügbarer OSMs abnehmen zu können.

Autorität:

Die Autorität bestimmt im Wesentlichen die *zulässigen Eingriffsmöglichkeiten* eines Assistenzsystems und wird typischerweise in Form von Automationsgraden (Kapitel 2.3) repräsentiert. Je nach zugewiesenem Automationsgrad kann die Autorität und damit der Umfang seiner Unterstützungsleistung eines Assistenzsystems deutlich variieren. Angefangen von dem Anbieten von Lösungsvorschlägen, dem Treffen einer Vorselektion als potentielle Lösung für die gegenwärtig erkannte Konfliktsituation, bis hin zur partiellen, oder gar vollständigen Aufgabenausführung, mit und ohne Rückmeldung an den menschlichen Operateur.

Für die Kooperation mit einem Menschen benötigt ein Assistenzsystem ferner einen Leitfaden im Sinne eines Verhaltenskodex, der definiert, wie eine Kooperation mit dem menschlichen Teammitglied erfolgen soll. Ziel ist es dabei nicht, spezifische Einzelereignisse festzulegen, die exakt determinieren wann und mit welchen Mitteln ein Assistenzsystem einzugreifen hat, sondern vielmehr in einem globaleren Kontext Richtlinien aufzustellen, die Situationen aufzeigen, in den das Assistenzsystem Unterstützungsleistung anbieten soll und damit für sein menschliches Teammitglied in den Vordergrund tritt. Derartige Richtlinien, die das Verhalten eines Assistenzsystems gegenüber dem Menschen definieren, wurden erstmals von [Onken, 1994] als Weiterentwicklung der von [Billings, 1997] aufgestellten Forderungen an „*Human-Centered Automation*“ in zunächst zwei so genannten Grundforderungen an Assistenzsysteme formuliert. Diese wurden durch [Onken und Schulte, 2010] um eine dritte Anforderung erweitert:

1. *„The assistant system has to be able to present the full picture of the work situation from its own perspective and has to do its best by own initiatives to ensure that the attention of the assisted human operator(s) is placed with priority on the objectively most urgent task or subtask.“*
2. *„If according to requirement 1 the assistant system can securely identify as part of the situation interpretation that the human operator(s) cannot carry out the objectively most urgent task because of overtaking, then the assistant system has to do its best by own initiatives to automatically transfer this situation into another one which can be handled normally by the assisted human operator(s).“*
3. *„If there are cognitive tasks, the human operator(s) is (are) principally not capable to accomplish, or which are to high risk or likely a cause of too high costs, these tasks are to be allocated to the assistant system or operation-supporting means, possibly a supporting cognitive unit.“*

Diese Forderungen spezifizieren das vom Assistenzsystem erwünschte kooperative Verhalten, ähnlich wie wir es von einem menschlichen Teammitglied kennen und idealerweise erwarten würden.

Im Fokus steht hier die gezielte Unterstützung des Operators in Situationen in den er tatsächlich einer Unterstützung bedarf. Damit definieren sie im Wesentlichen die vorgesehene Adaptivität eines Assistenzsystems an den menschlichen Operator. Grundsätzlich gilt für ein Assistenzsystem nach dem in diesen Grundforderungen festgelegten Zuschnitt, dass es sich eher zurückhaltend verhält und den menschlichen Operator zunächst einmal die Aufgabe selbstständig mit seinen verfügbaren konventionellen Mitteln lösen lässt. Das Assistenzsystem greift erst im Notfall ein, welcher im Wesentlichen durch die Überforderung des Menschen mit seinen Aufgaben charakterisiert ist.

2.2 Operateuradaptivität durch Adaptive Automation

Gemäß der zweiten Grundforderung soll ein Assistenzsystem kritische Beanspruchungssituationen seines menschlichen Teammitgliedes erkennen und eigeninitiativ eingreifen, um diese Situation in eine für den Menschen wieder handhabbare zu überführen. Implizit steht hinter dieser Forderung eine dynamische Aufgaben-/Funktionsverteilung zwischen Mensch und Assistenzsystem in Abhängigkeit von der Beanspruchung des Operators. Hierbei handelt es sich um eine Forderung, die bereits seit Mitte der 70er Jahre [Rouse, 1976] in der Forschungslandschaft unter dem Begriff der *adaptiven Automation* [Scerbo, 1994] [Kaber u. a., 2001] [Inagaki, 2003] diskutiert wird, für die es jedoch bis heute keine zufriedenstellende Lösung gibt [Scerbo, 2002].

Ähnlich den Assistenzsystemen ist es das Ziel dieser Automationsform, den bekannten negativen Auswirkungen einer technologie-zentrierten, statischen, starren, dichotomischen Funktionsallokation zwischen Mensch und Automation, wie beispielsweise Verlust der Fähigkeiten, unausgeglichene Beanspruchung (Unter- und Überforderung), Verlust des Situations-/Systembewusstseins, „blindem“ Systemvertrauen, entgegenzuwirken, die sich letztendlich in einer reduzierten Leistung des Operators und damit des Gesamtsystems niederschlagen. So versucht dieser Automationsansatz mit Hilfe dynamischer und damit flexibler Funktionsallokation zwischen Mensch und Maschine, die Beanspruchung von Operateuren in einem optimalen (Performanz-)Bereich zu halten [de Greef und Arciszewski, 2009] [Endsley und Kiris, 1995], ihr Situationsbewusstsein zu verbessern, ihre Vigilanz zu steigern, sowie dem Verlust an Fähigkeiten vorzubeugen und allgemein eine bessere Miteinbeziehung des Operators in die Aufgabenerfüllung zu erreichen [Parasuraman u. a., 2008] [Parasuraman u. a., 1992] [Hilburn u. a., 1997].

Auslöser für diese dynamische Funktionsneuverteilung können nach Definition adaptiver Automation sowohl der menschliche Operator (*adaptierbare Automation*), als auch die Maschine bzw. das technische System (*adaptive Automation*) sein [Scerbo, 1994] [Scerbo, 1996] [Oppermann, 1994] [Prinzel, 2003] [Scerbo, 2008]. Die Herausforderung liegt dabei in der adaptiven Umsetzungsform. Unterschieden wird hier zwischen *situationsadaptiv* und *operateuradaptiv* [Scerbo, 1994]. Letzteres spiegelt dabei im Wesentlichen einen von [Onken und Schulte, 2010] in den Grundforderungen aufgestellten Auslöser für Unterstützung des Operators dar. Ziel dieser Operateuradaptivität ist es, die Unterstützung an den tatsächlichen Bedarf des Menschen [Rouse, 1988] [Hoc, 2001] [Hoc und Lemoine, 1998] [Klein u. a., 2004] [Endsley und Kiris, 1995], charakterisiert durch seine Beanspruchung (Unter-/Überforderung) (Kapitel 3), zu koppeln. Die Umsetzung dieser Anforderung, die auf den ersten Blick unscheinbar aussehen mag, bringt jedoch eine wesentliche, zu meisternde Herausforderung mit sich. So bedarf es hierfür der möglichst **kontinuierlichen Erfassung der Beanspruchung des menschlichen Operators**. Bei der Beanspruchung handelt es sich jedoch um eine subjektive Empfindung, die sich messtechnisch nicht direkt erfassen lässt (vgl. Kapitel 3). Daher greifen bisherige adaptive Automationsmechanismen für eine Erfassung des Operateurzustandes auf verschiedene Ansätze zurück, die sich an den unterschiedlichen Methoden zur Beanspruchungserfassung (vgl. Kapitel 3) orientieren. Als Grundlage dieser Ansätze/Methoden dienen beobachtbare Parameter (z.B. kritische Ereignisse [Scerbo, 1996], Performanz [Kaber und Riley, 1999] [Calmann u. a., 2002], psychophysiologische Messungen [Scerbo u. a., 2000] [Byrne und Parasuraman, 1996] [Bailey u. a., 2006]), sowie Modellvorstellungen des Operators (z.B. mathematische Modelle [Parasuraman u. a., 1992]).

Neben der Frage nach dem Eingreifzeitpunkt adressieren sowohl die adaptive Automation, als auch die zweite Grundforderung an Assistenzsysteme auch die Frage nach der in dieser Situation zu erfolgenden Unterstützungsleistung. Während adaptive Automation hierfür pauschal gesprochen eine Funktionsumverteilung bzw. Funktionsneuverteilung zwischen Mensch und Maschine vorsieht, lässt die Grundforderung an Assistenzsysteme an dieser Stelle die Art des Eingriffs zunächst offen. Vielmehr wird hier das zu erreichende Ziel, „*die Situation soll in eine für den Operateur wieder handhabbare überführt werden*“, formuliert. Die Transformation der Aufgabensituation in eine wieder handhabbare kann dabei sowohl durch eine Aufgabenumverteilung zwischen Mensch und Automation erfolgen, aber auch beispielsweise durch gezieltes Ausnutzen noch freier Ressourcen des Operators erreicht werden. Im Folgenden werden beide Alternativen kurz diskutiert.

Der Frage nach der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Automation kann mit dem Begriff des Automationsgrades (*LoA - Level of Automation*) angenähert werden. Dieser definiert das Maß der Unterstützung durch das System. Hinsichtlich der möglichen Ausprägungen von Automationsgraden existieren eine Reihe von unterschiedlichen Skalen. Im einfachsten Fall werden hierfür zwei Automationsstufen (Ausführung der Aufgabe oder Funktion durch den Menschen bzw. durch das System) vorgesehen. Es finden sich jedoch auch deutlich feinere Granulierungen an Automationsstufen, die es ermöglichen, die Unterstützung durch die Automation mehr an den Bedarf des menschlichen Operators bzw. die aktuelle Situation anpassen zu können. So definieren beispielsweise [Rouse und Rouse, 1983] drei LoA (*manual / management-by-consent / management-by-exception*), [Endsley, 1987] fünf LoA (*manual control / decision support / consensual artificial / intelligence / monitored AI / full automation*) und [Endsley und Kaber, 1999] zehn LoA (*manual control, action support, batch processing, shared control, decision support, blended decision making, rigid system, automated decision making, supervisory control, full automation*). Die wohl bekannteste LoA-Skala von [Sheridan und Verplank, 1978] umfasst zehn unterscheidbare Aufgabenverteilungen (siehe Abbildung 2.4), angefangen von einer Aufgabenverteilung, in der ausschließlich der Mensch handelt ohne eine Automationsbeteiligung, bis hin zu einer vollständig maschinellen Aufgabenausführung ohne jegliche Beteiligung eines menschlichen Operators.

Automation Level	Automation Description
1	The computer offers no assistance: human must take all decision and actions.
2	The computer offers a complete set of decision/action alternatives, or
3	narrows the selection down to a few, or
4	suggests one alternative, and
5	executes that suggestion if the human approves, or
6	allows the human a restricted time to veto before automatic execution, or
7	executes automatically, then necessarily informs humans, and
8	informs the human only if asked, or
9	informs the human only if it, the computer, decides to.
10	The computer decides everything and acts autonomously, ignoring the human.

Abbildung 2.4: Levels of Automation [Sheridan und Verplank, 1978]

Die Anwendung dieser Automationsgrade kann sich dabei auf eine gesamte Aufgabe (z.B. Flugführung), auf Teilaufgaben (z.B. laterale Flugführung) [Rouse und Rouse, 1983] [Scallen und Hancock, 2001], oder nach [Parasuraman u. a., 2000] auch auf die unterschiedlichen Informationsver-

arbeitsstufen (vgl. Abbildung 2.5) innerhalb einer Aufgabe beziehen. Letztere bietet dabei die Möglichkeit für jede Aufgabe unterschiedliche Automationsgrade für die Bereiche Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und Aktionsausführung zu wählen. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Automatisierung in den einzelnen Stufen nicht vollkommen unabhängig voneinander erfolgen kann.

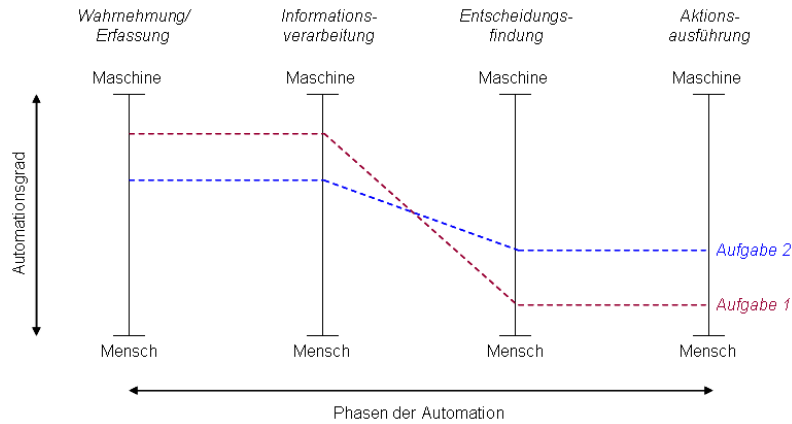


Abbildung 2.5: Anwendung unterschiedlicher Automationsgrade in den verschiedenen Phasen der Informationsverarbeitung (nach [Parasuraman u. a., 2000])

Weitere Handlungsoptionen des Assistenzsystems neben der erörterten Aufgabenum- bzw. -neuverteilung, sowie einer Anpassung des Automationsgrades, sind die Möglichkeiten zur gezielten Aufmerksamkeitslenkung und eine ressourcenorientierte Informationsvermittlung. Ziel der Aufmerksamkeitslenkung ist es, die Aufmerksamkeit des Operators, gemäß der ersten Grundforderung an Assistenzsysteme, rechtzeitig auf die gegenwärtig dringlichste Aufgabe zu lenken. Dadurch sollen möglichst frühzeitig kritische Situationen infolge vernachlässigter Aufgaben vermieden werden. Eine ressourcenangepasste Informationsvermittlung sieht vor, einen weiteren Beanspruchungsanstieg infolge möglicher Ressourcenkonflikte, insbesondere in bereits erhöhten Beanspruchungsbedingungen, unter Ausnutzung noch freier, verfügbarer Interaktionsressourcen zu vermeiden [Maiwald und Benzler, 2010] [Maiwald und Schulte, 2011]. Dabei sollen Informationen vom System gerade auf den Sinnesmodalitäten zur Verfügung gestellt werden, bei denen gegenwärtig keine Ressourcenkonflikte [Wickens, 1992] zu erwarten sind.

Für die hier bedeutsamere Reduzierung der Beanspruchung weisen [Parasuraman und Hancock, 2000] den oben genannten Automationsgraden zwei unterschiedliche Strategien zur Reduzierung der Beanspruchung zu. In diesem Zusammenhang wäre zunächst das Anbieten von Unterstützungsleistung (*Adaptive Aiding* - (AA)) zu nennen, welches sich auf die Automationsgrade zwei bis vier nach [Sheridan und Verplank, 1978] bezieht. Diese Unterstützungsleistung kann sich dabei sowohl auf die notwendige Informationsvermittlung, als auch auf eine Unterstützung in der Entscheidungsfindung erstrecken. Ab dem Automationsgrad fünf und höher, sprechen [Parasuraman und Hancock, 2000] von einer Übernahme von (Teil-) Aufgaben und bezeichnen diese Form der Belastungsreduktion als *ATA-M* („*Adaptive Task Allocation to the Machine*“).

In Unterforderungssituationen soll der menschliche Operator durch eine adaptive, aktive Aufgabenzuweisung (*ATA-H* - „*Adaptive Task Allocation to Human*“) wieder in das aktuelle Geschehen mit einbezogen werden. Ziel entsprechender Maßnahmen ist es, dem Verlust an Vigilanz und der damit oftmals in Verbindung stehenden Verminderung des Situationsbewusstseins („*out-of-the-loop-phenomenon*“) entgegen zu wirken. Als eine solche Art der Aufgabenzuweisung schlagen [Veltman und Jansen, 2006] „*intermediate manual control*“ vor. Untersuchungen von [Parasuraman, 1986] belegen die positive Auswirkung dieser Aufgabenzuweisung an den Operator, die den Menschen dazu bringt, seine Information in kontinuierlichen Zeitabständen zu aktualisieren und somit ermöglicht, seine Performanz aufrecht zu erhalten. [Parasuraman und Hancock, 2000] weisen jedoch

einschränkend darauf hin, dass diese Strategie der Aufgabenzuweisung an den Menschen nicht in jedem Fall funktionieren muss

„... clearly it can not be pursued generally for all automated tasks and all times, for it would lead to excessive manual workload, thus defeating one of the principal purposes of automation“.

Weisen Assistenzsysteme die hier genannten Möglichkeiten (AA, ATA-M, ATA-H) eines unterstützenden Eingriffs in den Arbeitsprozess auf, dann werden sie nach [Parasuraman und Hancock, 2000] als „Joint Adaptive Systems“ bezeichnet.

Abbildung 2.6 versinnbildlicht hierzu mögliche Handlungsalternativen eines Assistenzsystems in Abhängigkeit von der Operateurbeanspruchung, hier vereinfacht dargestellt als schwankender Verlauf über die Zeit.

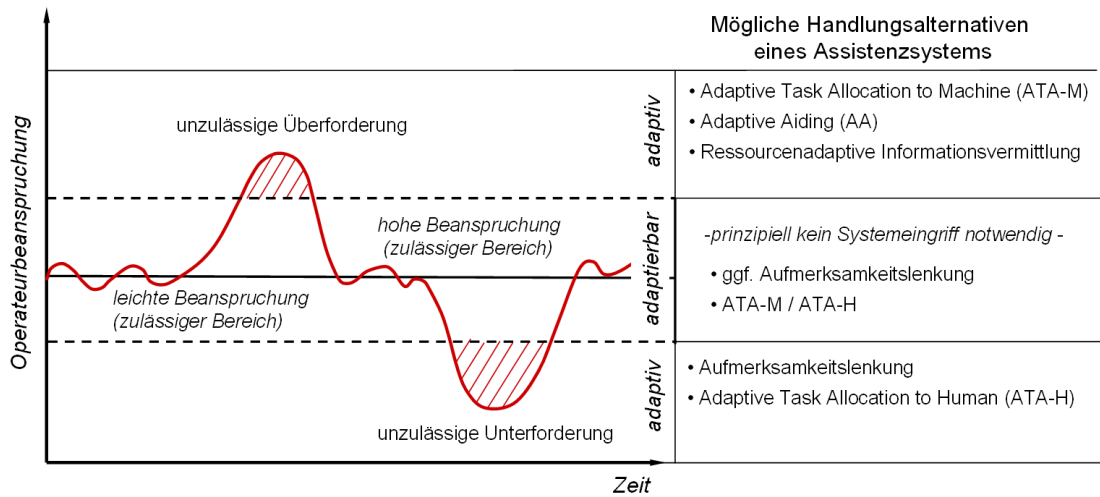


Abbildung 2.6: Mögliche Handlungsalternativen eines Assistenzsystems bei Über-/Unterforderung des menschlichen Operateurs (in Anlehnung an [Chignell und Hancock, 1985])

Die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine, strukturiert gemäß der Automationsgrade, bedingt zwangsläufig einen entsprechenden Autonomie-, bzw. Autoritätsgrad des Systems [Kaber und Endsley, 2003]. Insbesondere in höheren Automationsstufen zeigt sich, dass sich die Autorität eines Systems und die Verantwortung des Operateurs für exakte/korrekte Umsetzung der Aufgabe antagonistisch gegenüberstehen. So sehen Verfechter der „human-centered“ Automation den Menschen, eingebettet in einem Mensch-Maschine-System, als einzige, vor allem jedoch als finale Autorität. Ihrer Ansicht nach darf ausschließlich der Mensch Entscheidungen über Zeitpunkt und Art der Funktionszuweisung zwischen Mensch und Maschine treffen [Billings, 1997]. Begründet wird dies mit der Verantwortlichkeit des menschlichen Operateurs für das Gesamtverhalten des Systems.

[Rouse, 1988] gibt indessen zu bedenken, dass ein Mensch in kritischen Situationen, in denen er tatsächlich einer maschinellen Unterstützung bedarf, kaum mehr über Ressourcen verfügt, um die dafür notwendigen Interaktionen mit dem System in dieser Situation selbst durchführen zu können. Nach [Scerbo, 1996] und [Inagaki, 2003] wäre es insbesondere in kritischen Situationen, die durch eine potentielle Gefahr für Mensch und Gerät gekennzeichnet sind, notwendig, dass auch das technische System die Autorität für eine Änderung der Aufgabenverteilung bzw. eine Anpassung des Automationsgrades besitzt, um so eine Gefahr bzw. potentiellen Schaden zu vermeiden.

Eine im Vorfeld festgelegte, situationsbezogene Autoritätszuordnung zur Maschine, um möglichen

kritischen Situationen bereits im Ansatz entgegen zu wirken, stellt nach [Inagaki u. a., 1999] hier erstaunlicherweise jedoch keine optimale Lösung dar. So zeigen [Inagaki u. a., 1999] und [Inagaki, 2000] im Rahmen von Untersuchungen zu Startabbrüchen von Piloten, dass weder ausschließlich der menschliche Operateur (Pilot), noch ausschließlich das System die Autorität für diese Entscheidung besitzen sollte. Hier erweist sich der Ansatz der *geteilten Autorität (shared-authority)* zwischen Mensch und Maschine für die Anpassung des entsprechenden Automationsgrades an die vorherrschende Situation als bester Ansatz für eine Autoritätsverteilung [Inagaki u. a., 1999] [Inagaki, 2000] [Inagaki, 2003].

Es zeigt sich, dass dynamische Funktionsallokation durch Variation der Automationsgrade ein Mittel darstellen kann, um einer Über- als auch Unterforderung eines Operators durch gezieltes Involvieren bzw. Entlasten entgegen zu wirken. Gleichzeitig ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass diese dynamische Veränderung der Aufgaben- und Autoritätsverteilung zwischen Mensch und Maschine unter Umständen nicht nur positive Auswirkungen besitzt. So bemerken [Billings und Woods, 1994] in diesem Zusammenhang insbesondere die Problematik der Vorhersagbarkeit von Systemzuständen und Aufgabenverteilungen zwischen menschlichen Operateur und Automation. Auch gibt [Inagaki, 2003] zu bedenken, dass Aufgaben, die der Automation übertragen werden, nicht notwendigerweise fehlerfrei ablaufen. Hier handelt es sich um einen typischen Trugschluss. So stellt die Automatisierung einer Aufgabe kein Garant für Fehlerfreiheit dar. Einflüsse im Sinne von Fehlerquellen, die hier nach [Inagaki, 2003] eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen, sind insbesondere Hard- und Softwarefehler, als auch unzureichende Information.

2.3 Adaptive Fähigkeiten realisierter Assistenzsysteme

Unabhängig ob unter der Bezeichnung adaptiver Automation oder im Rahmen der zweiten Grundforderung an Assistenzsysteme sehen diese Ansätze eine am menschlichen Operateur orientierte, adaptive Unterstützung vor. Im Folgenden soll nun die Umsetzung dieser Operateuradaptivität anhand verschiedener in Forschungsvorhaben entwickelter Pilotenassistenzsysteme und zwar *COGPIT*, *PA* beziehungsweise *RPA*, sowie *CASSY* beziehungsweise *CAMA* kurz untersucht werden¹. Auf entsprechende Literaturstellen sei in den jeweiligen Unterabschnitten verwiesen. Die Betrachtung dieser Assistenzsysteme soll hierbei hinsichtlich des Gesichtspunktes der Operateuradaptivität, unterteilt in die Erfassung des Operateurzustandes durch das System, sowie den daraus abgeleiteten Systemreaktionen, erfolgen.

2.3.1 COGnitive cockPIT - COGPIT

Die Bezeichnung *COGPIT (COGnitive cockPIT)* steht für ein Technologiedemonstrationsprojekt des englischen Verteidigungsministeriums (MOD), hier verkörpert durch die damals noch existierende DERA (Defence Evaluation Research Agency). Ziel des Projektes war es, ein intelligentes Pilotenunterstützungssystem für einen einsitzigen Militärjet zu entwickeln, das den Piloten von verschiedenen Routinetätigkeiten entlastet und ihm damit die Möglichkeit bietet, seine kognitiven Fähigkeiten auf die taktischen Aspekte der Mission zu konzentrieren. Das System setzt sich im Wesentlichen aus vier Hauptkomponenten zusammen (vgl. auch Abbildung 2.7):

¹ Hier wäre prinzipiell auch *Copilote Electronique* als französische Entwicklung eines „adaptiven“ Assistenzsystems zu nennen. Eine genauere Analyse dieses Assistenzsystems ist jedoch infolge der unzureichend zugänglichen Literatur nicht möglich.

- SASS (*Situation Assessment Support System*)
- COGMON (*Cognition Monitor*)
- TIM (*Tasking Interface Manager*)
- PACT (*Pilot Authorisation and Control of Tasks*) (Bestandteil des TIM)

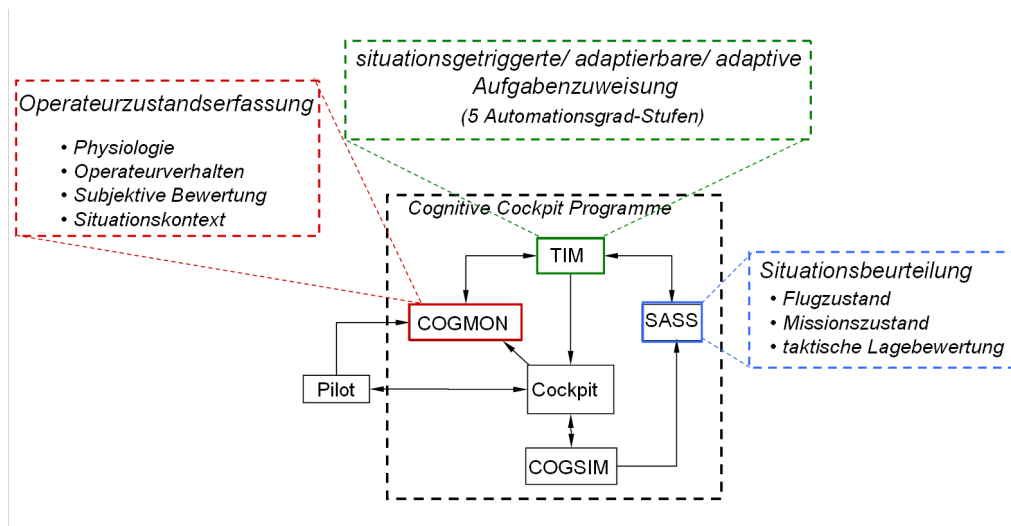


Abbildung 2.7: Situationserfassung und Umsetzung adaptiver Fähigkeiten dargestellt in der COG-PIT Agenten Architektur [Taylor, 2001]

Erfassung des Operateurzustandes:

Zuständig für die Erfassung des Operateurzustandes im *COGPIT* ist das Modul *COGMON* (Abbildung 2.7). Der Operateurzustand umfasst nach Aussage der Autoren dabei nicht nur den Aspekt der Beanspruchung, sondern eine Reihe anderer Gesichtspunkte [Taylor u. a., 2002]:

„...levels of stress and alertness, current physical and mental demand, current locus of attention, nature of cognitive activity, current context as well as higher-order concepts such as pilot intent and situation awareness ...“

Hiermit werden eine Reihe hochgesteckter Ziele formuliert. Da die Beobachtung all dieser Aspekte nicht mit Hilfe einer einzelnen Messmethode möglich ist, verwendet *COGMON* hierfür im Wesentlichen vier verschiedene Informationsquellen:

- physiologische Messungen,
- Beobachtungen von Verhaltensparametern,
- subjektive Empfindungen,
- Situationskontext.

Als *physiologische Parameter* werden Herzrate, Atmung, Elektromyogramm, elektrodermale Aktivität, Hauttemperatur, Elektro-Okulographie und EEG verwendet. Auf diese Weise wird versucht, Aussagen über den Faktor Stress zu gewinnen. Messungen der Blickbewegungsaktivität (z.B.

Liedschlussfrequenz und Fixationsort) sollen zusätzliche Informationen über die visuelle Aktivität des Operators und damit Aussagen über die Wachsamkeit und die Aufmerksamkeitszuteilung liefern. Aussagen über die kognitive Beanspruchung hingegen werden aus Fluktuationen der elektrischen Hirnaktivität des Operators (EEG) abgeleitet [Taylor u. a., 2002].

Verhaltensdaten des Operators, in diesem Fall repräsentiert durch Interaktionen des Operators mit den Bedienelementen des Cockpit, aber auch über Spracheingabe werden dazu verwendet, um auf die aktuell durchgeführten Prozeduren und damit verbunden die notwendigen kognitiven Aktivitäten zu schließen. Die erwarteten kognitiven Aktivitäten für die einzelnen Prozeduren wurden hierfür a-priori in einer entsprechenden Datenbank hinterlegt. Durch kontinuierliche Beobachtungen der Interaktionen des Piloten soll das Initiieren sowie der Fortschritt einzelner Handlungssequenzen ermittelt werden.

Gleichzeitig beobachtet *COGMON* spezifische Kombinationen von Handlungssequenzen, um auf aktuelle Absichten des Piloten, auf Basis identifizierter globalerer Ziele zurückschließen zu können.

Neben physiologischen und Verhaltensdaten verwendet *COGMON* weiterhin **subjektive Bewertungen**. Diese werden vom Operateur mit Hilfe des *Pilot Load Indicator (PLI)* abgefragt. Hierbei handelt es sich um eine Reihe von Druckknöpfen, die es dem Piloten erlauben, dem System seinen aktuell subjektiv empfundenen Zustand mitzuteilen. Dabei werden die Stufen „*I am drowsy, bored, stressed, or experiencing high levels of workload*“ unterschieden [Taylor u. a., 2002]. Zusätzlich existiert noch ein „*emergency button*“, der in Situationen hoher Beanspruchung betätigt werden soll. Dieser soll insbesondere in den Fällen zum Tragen kommen, in denen die Bedienung des *PLI* eine weitere Quelle zusätzlicher Belastung darstellt und infolge dessen nicht mehr erwartet werden kann, dass der Pilot diesen noch wie gewünscht betätigt.

Parallel zur subjektiven Bewertung wird in *COGMON* a-priori Wissen über Beanspruchungs- und Stresswerte einzelner Prozeduren verwendet. Dieses Wissen wurde im Vorfeld im Rahmen von Piloteninterviews gewonnen.

Als letzte Quelle verwendet *COGMON* den **Missionskontext**, wie beispielsweise Flugparameter, Bedrohungsgrad und den Funktionsstatus des Luftfahrzeugs. Diese Informationen nutzt *COGMON* zur Interpretation der anderen Messdaten. Ferner werden Informationen über umgebende Geräusche, Beleuchtung, Vibration und Temperatur berücksichtigt, die eine mögliche Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Piloten, aber auch auf die verwendeten psycho-physiologischen Sensoren haben könnten.

Situationstransfer:

Der Transfer der Aufgabensituation in eine für den Operateur wieder handhabbare Situation, d.h. im Sinne der zweiten Onkenschen Grundforderung, erfolgt im *COGNitive cockPIT* sowohl *adap-tierbar* als auch *adaptiv*. Grundlage hierfür stellt das Kernmodul TIM dar.

Wichtigster Bestandteil für die Anpassung der Automationsgrade ist dabei das strukturierte Konzept *PACT (Pilot Authorisation and Control of Tasks)*. Dieses kommt im Modul *TIM* zur Anwendung und stellt die Grundlage für eine dynamische Funktionsallokation auf Basis verschiedener im System vorgesehener Automationsgrade (siehe Abbildung 2.8), so genannter *PACT-Level*, dar. Der durch die *PACT-Level* bereitgestellte Autonomiegrad resultiert aus einer Kombination der Automationsgradskalen von [Sheridan und Verplank, 1978] und [Endsley und Kiris, 1995] und lässt sich in drei übergeordnete Modi (*automatic, assisted und commanded*) unterteilen [Diethe u. a., 2004]. Der *assisted*-Mode besitzt zudem noch eine verfeinerte Abstufung in *direct support*, in *support*, *advisory* und *at call*.

Grundlegende Idee hinter dieser Aufgabensteuerung mit Hilfe von *PACT-Level* ist, dass der Pilot eine Art Abkommen (*PACT* im Sinne von „Pakt“) mit der Automation schließt, auch bezeichnet als

„*contractual autonomy*“. Hierbei ordnet der Pilot einzelnen Aufgaben bzw. Aufgabengruppen im Vorfeld, beispielsweise als standardisierte Voreinstellung, oder missionsspezifisch im Rahmen einer Vorflugplanung, einzelne *PACT*-Modes zu. Dies ermöglicht es TIM in der späteren Missionsdurchführung, die *PACT-Level* einzelner Aufgaben/-gruppen innerhalb der vom Operateur genehmigten Bandbreite für diese Aufgabe zu variieren [Diethe u. a., 2004]. Vorwiegendes Ziel dieser „*contracts*“ zwischen Operateur und Automation ist es, ein Vertrauen zwischen Operateur und Automation in einer sich dynamisch ändernden Aufgabenbeziehung zu schaffen, und Überraschungen des Operateurs, durch adaptive Automationsgradänderung der Aufgaben soweit wie möglich zu reduzieren [Diethe u. a., 2004]. Gleichzeitig behält der Pilot mit Hilfe dieser *PACT*-Abkommen die Autorität und bleibt exekutiver Überwacher [Taylor u. a., 2002], während er die Verantwortung der Aufgabenausführung abhängig vom gewählten Automationsgrad an die Automation delegiert.

Wie bereits angedeutet, handelt es sich hierbei um eine adaptierbare und adaptive Funktionsallokation zwischen Mensch und Automation. So kann sowohl der Pilot, als auch das System (in der vom Operateur zulässigen Bandbreite), den Automationsgrad von Aufgaben/-gruppen ändern.

Im Rahmen *adaptierbarer* Automation besitzt der Pilot hierfür ein Bediengerät im Cockpit, das es dem Operateur erlaubt, Automationsgrade einzelner bzw. mehrerer Aufgaben zur Laufzeit zu ändern. Eine *adaptive* Anpassung der Automationsgrade und damit der Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Automation erfolgt im *TIM* unter Verwendung von Informationen über den Zustand des Piloten aus dem *COGMON (operatoradaptiv)*, von Informationen bezüglich des gegenwärtigen Flugzustandes (*SASS (situationsadaptiv)*), sowie der aktuellen taktischen Lage (*SASS (situationsadaptiv)*). Der adaptive Eingriff des Systems erfolgt in COGPIT hierbei nicht nur im Falle hoher Operateurbeanspruchung in Form einer Aufgabenabnahme, sondern auch in zu geringen Beanspruchungsbedingungen, durch eine entsprechende Reduzierung des Automationsgrades [Diethe u. a., 2004]. Letzteres soll es dem Piloten ermöglichen einen hohen Grad an Situationsbewusstsein aufrecht zu erhalten und eine Reduzierung seiner Fähigkeiten zu vermeiden.

Primary Modes	Levels	Operational Relationship	Computer Autonomy	Pilot Authority	Adaptation	Information on performance
AUTOMATIC		Automatic	Full	Interrupt	Computer monitored by pilot	On/off Failure warnings Performance only if required.
ASSISTED	4	Direct Support	Advised action unless revoked	Revoking action	Computer backed up by pilot	Feedback on action. Alerts and warnings on failure of action.
	3	In Support	Advice, and if authorised, action	Acceptance of advice and authorising action	Pilot backed up by the computer	Feed-forward advice and feedback on action. Alerts and warnings on failure of authorised action.
	2	Advisory	Advice	Acceptance of advice	Pilot assisted by computer	Feed-forward advice
	1	At Call	Advice only if requested.	Full	Pilot, assisted by computer only when requested.	Feed-forward advice, only on request
COMMANDED		Under Command	None	Full	Pilot	None performance is transparent.

Abbildung 2.8: PACT System für adaptive Funktionsallokation [Bonner u. a., 2000]

Systemevaluierung:

Veröffentlichungen hinsichtlich einer tatsächlichen Systemreife von COGPIT sind leider nur singular vorhanden. So berichtet [Dickson, 2005] von einer Simulatorkampagne mit sechs Versuchspersonen. Der Fokus hierbei lag auf der Evaluierung der adaptiven Komponenten. Im Vordergrund standen hier die Untersuchungen des *Cognition Monitors* als Echtzeiterfassungssystem des Operateurzustandes, sowie der auf Basis des *Cognition Monitors* eingeleiteten Systemreaktion (Anpas-

sung des Automationsgrades) [Dickson, 2005], sowie ein Stabilitätsnachweis des Systems. Ergebnisse dieser Kampagne besagen, dass der COGMON die kognitiven Anforderungen einer Aufgabe widerspiegeln konnte, und das auf Basis der durch COGMON ermittelten kognitiven Operateurbeanspruchung eine entsprechende Änderungen des Automationsgrades ausgelöst werden konnte (Abbildung 2.9).

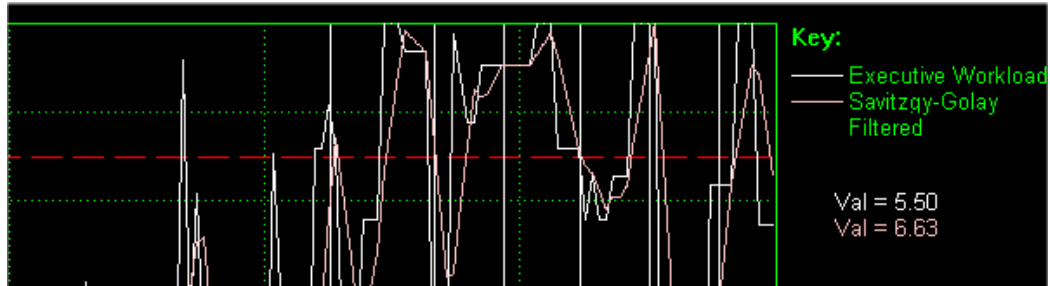


Abbildung 2.9: Beispiel einer gefilterten Ausgabe des COGMON mit Automationsgradanpassungen (vertikale weiße Linien) und des oberen Grenzwertes, dargestellt als rot gestrichelte Linie (unterer Grenzwert nicht dargestellt) [Diethe u. a., 2004]

Leider finden sich keine Informationen hinsichtlich einer Gesamtsystemvalidierung. Auch Informationen inwiefern mit Hilfe der hier realisierten adaptiven Automation eine Leistungssteigerung des Operateurs und damit des Gesamtsystem bewirkt werden konnte sind nicht publiziert. Ferner finden sich keine Details zur Validierung einzelner in COGPIT verwendeter Methoden und Ansätze, wie beispielsweise die Annahmen bezüglich notwendiger kognitiver Aktivitäten für einzelne Aufgaben, noch für die Verwendung des PLI als sinnvoller Indikator für die Operateurbeanspruchung.

2.3.2 Pilot's Associate (PA) und Rotorcraft Pilot's Associate (RPA)

Aufbauend auf dem *Pilot's Associate* Programm der DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), welches sich mit Kampfflugzeugmissionen beschäftigte, sollte im *RPA (Rotorcraft Pilot's Associate)* ein intelligentes System der nächsten Generation für einen Angriffs-/Aufklärungshubschrauber entwickelt werden. Die Bezeichnung „*associate*“ steht dabei für eine Reihe intelligenter Unterstützungsfunktionalitäten, die gemeinsam ein menschenähnliches Systemverhalten repräsentieren sollten. Nach [Miller und Hannen, 1998] sollen diese „Associate“ Systeme über folgende Fähigkeiten verfügen:

- „*perform roughly the same breadth of activities as a human expert in the domain*“
- „*take initiative when necessary, but generally follow a human colleague's lead and*“
- „*integrate over ongoing activities to exhibit robust, coordinated, appropriate behaviour*“

Im Rahmen des RPA Programms war es das Ziel, Crews in zukünftigen Hubschraubermissionen zur richtigen Zeit mit allen für die Mission relevanten Informationen zu versorgen. Hierbei sollte das Situationsbewusstsein beider Crewmitglieder verbessert werden, ohne jedoch durch die Informationsbereitstellung, sowie -vermittlung einen Anstieg in der Beanspruchung der Operateure zu verursachen [Miller u. a., 1999].

Grundlegende Bestandteile des *RPA* (Abbildung 2.10) sind das *Advanced Mission Equipment Package*, bestehend aus seiner Reihe fortschrittlicher, jedoch konventioneller Automation im Bereich der Sensorik (Sensoren, Kommunikation, Zielerfassungssysteme), und dem *Cognitive Decision Aiding System* (CDAS). CDAS stellt hierbei die Hauptfunktionalität des *Associate Systems* dar und umfasst im Wesentlichen eine *Situationserfassung*, die sowohl Kampf-/Missionsgeschehen (extern), sowie den Zustand des Luftfahrzeugs (intern) berücksichtigt, verschiedene Planungsfunktionalitäten (z.B. Routen, Kommunikation, Sensor Management) und den *Cockpit Information Manager* (CIM) als intelligente Benutzerschnittstelle.

Der Fokus der weiteren Betrachtungen liegt auf dem Modul CIM. Dieses berücksichtigt für eine optimale Informationsvermittlung die Beanspruchung des Operators. Die Ermittlung dieser Beanspruchung basiert hierbei auf einer Abschätzung, deren Grundlage ein Aufgabenmodell und unterschiedliche Displaykonfigurationen darstellen.

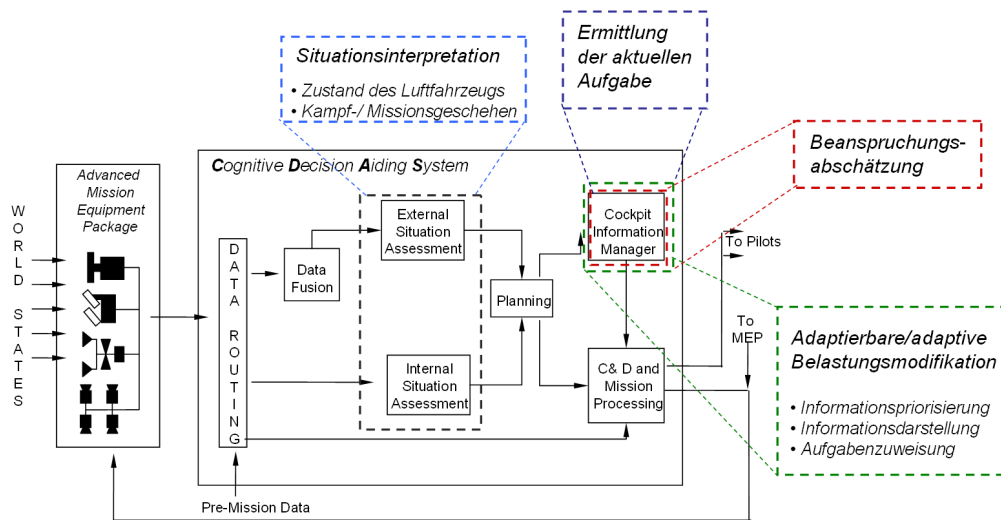


Abbildung 2.10: Situationserfassung und adaptive Funktionalitäten des RPA, integriert in die Darstellung der Funktionalen Architektur nach [Miller und Hannen, 1999a]

Abschätzung der Operateurbeanspruchung zur optimalen Informationsvermittlung:

Im Gegensatz zu dem Forschungsvorhaben *COGPIT* wird im *RPA* der Operateurzustand (d.h. hier die Beanspruchung) nicht für dynamische Aufgabenallokation zwischen Mensch und Automation verwendet, sondern lediglich für eine Abschätzung der optimalen Informationsvermittlung und -darstellung. Ziel ist es dabei für die aktuellen Aufgaben die dafür notwendige Information (priorisiert und gefiltert) möglichst optimal darzustellen.

Basierend auf einem Aufgabennetzwerk werden die aktuellen Aufgaben der Operateure anhand von Pilotenaktionen bzw. gegenwärtigen Weltzuständen (*Context Model*) ermittelt (vgl. Abbildung 2.11). Bei abweichenden Situationen bzw. Aktionen werden die Pilotenaktionen vor dem Hintergrund des Aufgabennetzwerkes, sowie unter Miteinbeziehung von Wissen über Ziele hinsichtlich alternativ verfolgter Pläne und Ziele überprüft, und bei Bedarf das Aufgabennetzwerk entsprechend angepasst [Miller und Hannen, 1998] [Miller, 2004].

Sobald sich aktive Aufgaben ändern, ermittelt der *Cockpit Information Manager* (CIM) eine neue Cockpitkonfiguration. Hierbei entscheidet CIM welchem Akteur der Crew diese Aufgabe legal zugewiesen werden soll. Dies wird als *Actor Configuration Option - ACO* bezeichnet. Für jede *ACO* existiert entsprechendes a-priori Wissen hinsichtlich erwarteter, priorisierter Informationsanforderungen (*PIR*) [Miller u. a., 1999].

Der nachfolgende *Channel Allocator*, versucht diesen *PIRs* durch Auswahl entsprechender Präsentationselemente (*PE*) z.B. in Form von graphischen Symbolen oder akustischen Signalen gerecht zu werden. Die Kombination bestehend aus ausgewählten Akteuren und Präsentationselementen kann dabei verschiedene negative Auswirkungen, beispielsweise auf Pilotenerwartung, Informationsbe-

dürfnisse, oder Displaystabilität verursachen, die in so genannten „*violation scores*“ gespeichert werden [Miller und Hannen, 1998] [Miller und Hannen, 1999b].

Sobald also eine Cockpitkonfiguration für die Akteure bestimmt wurde, ermittelt der *Taskload Estimator* zunächst die Beanspruchung des Operators für die Durchführung dieser Aufgabe unter der dafür vorgesehenen Displaykonfiguration. Hierbei handelt es sich um eine aufgabenbasierte Beanspruchungsabschätzung unter Miteinbeziehung der für Informationsvermittlung verwendeten Displaykonfiguration.

Die Beanspruchungsabschätzung, sowie die zuvor ermittelten „*violation scores*“ stellen die Eingangsdaten für eine Evaluierungsmatrix [Miller u. a., 1999] [Miller und Hannen, 1999b] des *Configuration Managers* dar. Hier erfolgt der letzte Schritt der Optimierung, indem durch Variation von zuvor getroffenen Design-Entscheidungen und Cockpitkonfigurationen des CIM versucht wird, eine möglichst optimale Konfiguration zu finden.

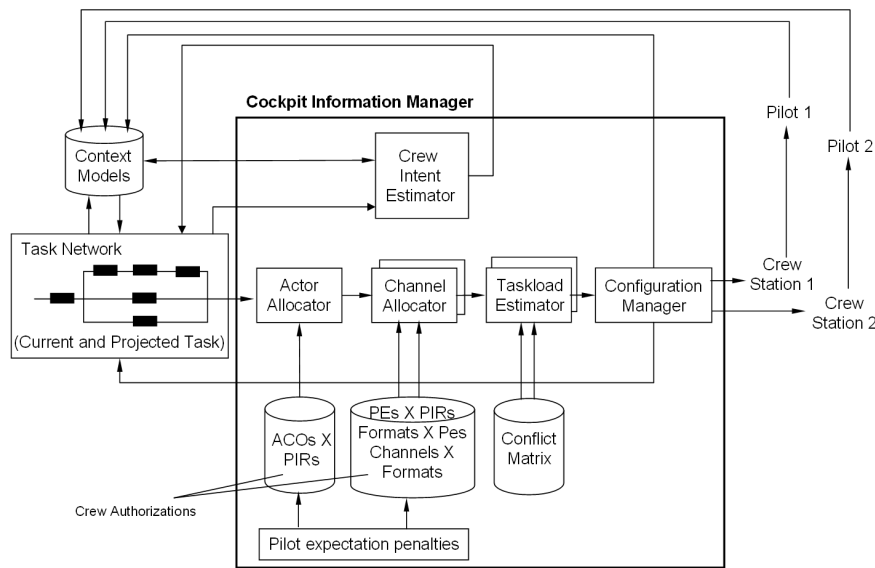


Abbildung 2.11: Architektur des Cockpit Information Manager [Miller und Hannen, 1998]

Systemevaluierung:

Der RPA wurde bereits während der Entwicklung, als auch in der finalen Version in verschiedenen Simulationsstudien anhand von Teilaufgaben, Teilmissionen (ca. 20-50 min) und vollständigen Mission (ca. 1h-1,5h), sowie in einer Performanz-Demonstration getestet und evaluiert [Benes und Robertson, 1999] [Miller u. a., 1999] [Miller und Hannen, 1998].

Die Evaluierung des CIM [Miller u. a., 1999] [Miller und Hannen, 1998] erfolgte dabei unter Verwendung subjektiver Fragebögen. Hier zeigte sich, dass die ursprünglich postulierte Anforderung, die richtige Information zur richtigen Zeit darzustellen und zu vermitteln, ohne dabei die Beanspruchung der Operateure zu steigern, erreicht werden konnte. Die Beanspruchung wurde dabei jeweils am Ende einer Teilmission / Mission unter Verwendung des NASA-TLX Verfahrens erhoben. Es zeigte sich, dass die so ermittelte Beanspruchung der Operateure bei Verwendung des CDAS signifikant geringer gegenüber des Testsystems ohne CDAS (ausschließlich mit AMEP) war [Miller u. a., 1999] [Miller und Hannen, 1998]. Ferner blieb trotz adaptiver Displaykonfigurationen das System für die Operateure vorhersagbar.

Die Performanz-Evaluierung fokussierte sich auf Taktiken, Techniken und Prozeduren (*TTP*). Hier konnten infolge der unterschiedlich verwendeten Szenarien kaum wiederholbare, oder vergleichbare Ergebnisse erzielt werden, so dass hier eine deutliche Verbesserung schwierig zu erkennen war.

2.3.3 CASSY und CAMA

Aufbauend auf einer Serie an Cockpitassistenzsystemen und überwiegend anknüpfend an die erfolgreichen Arbeiten in *CASSY* (Cockpit ASsistent System), einem Assistenzsystem zur Unterstützung im zivilen Instrumentenflug [Ruckdeschel, 1997] [Wittig, 1994] [Prevot, 1995] [Gerlach, 1996], entstand Mitte bis Ende der 1990er Jahre ein wissensbasiertes Assistenzsystem zur Unterstützung militärischer Cockpit Crews in Transportmissionen, bezeichnet als *CAMA* (*Crew Assistant Military Aircraft*) [Stütz, 1999] [Schulte, 2001]. *CAMA* stellte dabei eine Konkretisierung eines erstmals kognitiv-kooperativen Systemansatzes dar, in der charakteristische Elemente menschlicher Informationsverarbeitung, wie Situationsinterpretation (*Umweltinterpretation*, *Interpretation des Flugzustandes*), explizite Modellierung von Zielen zur Erkennung (*Situationsdiagnose*) und Lösung von Konflikten (*Mission Planner*) realisiert wurden (vgl. Abbildung 2.12). Ferner spielte hier der kooperative Aspekt, die Berücksichtigung der Crew, durch Interpretation von Operateuraufgaben, -ressourcen, -absichten und -fehlern [Strohhal, 1999] eine entscheidende Rolle.

Gefördert durch das BMVg (Bundesministerium der Verteidigung) wurde CAMA von der UniBw in Kooperation mit den industriellen Partnern ESG (Elektroniksystem und Logistik GmbH), DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), sowie DASA (Daimler-Benz Aerospace AG) entwickelt.

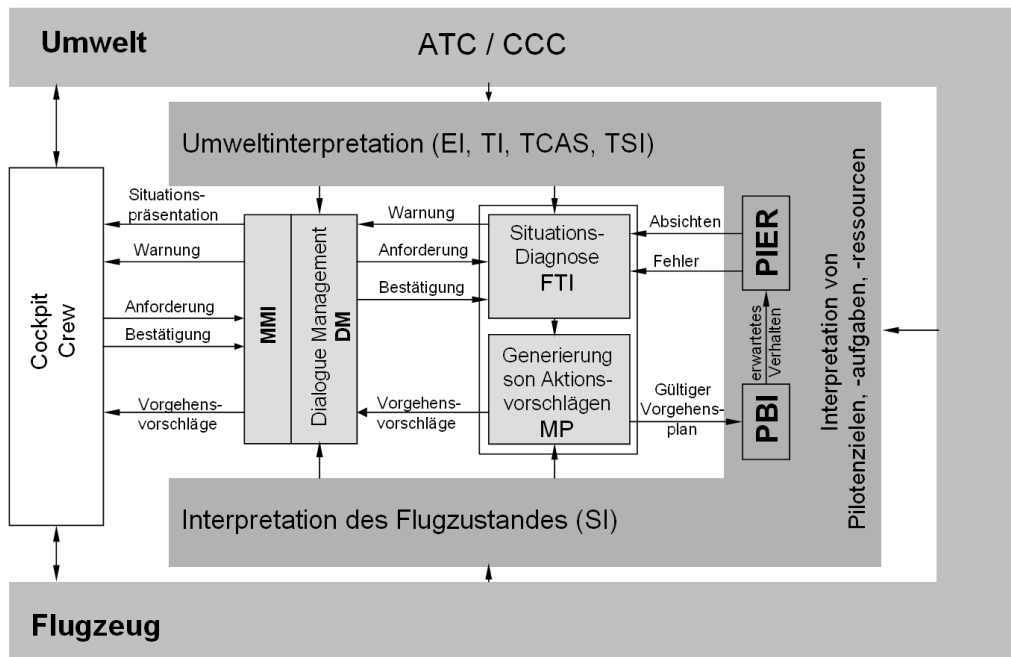


Abbildung 2.12: CAMA - Funktionale Architektur

Operateurzustandserfassung:

Ähnlich wie bereits im zuvor beschriebenen Technologiedemonstratorprojekt *COGPIT*, verwendet auch *CAMA* parallel verschiedene Ansätze/Methoden um möglichst unmittelbar eine Aussage über kritische Beanspruchungszustände des Operators, als Auslöser für eine Unterstützungsleistung, zu identifizieren. So nutzt *CAMA* für diesen Rückschluss, sowohl den aktuellen Situationskontext (*situationsadaptiv*), als auch das Operateurverhalten (*operateuradaptiv*).

Der situationsadaptive Ansatz basiert hierbei auf einer Abschätzung möglicher kritischer Operateurbeanspruchungszustände, bezogen auf das Auftreten bestimmter Situationsereignisse, wie beispielsweise das plötzliche Aufkommen von Bedrohungen, oder das unerwartete Schließen des

ursprünglich geplanten Zielflughafens. Derartige Ereignisse sind mit einem nicht unerheblichen Umplanungsvorgang für den Operator verbunden. So wird in diesen Fällen pauschal davon ausgegangen, dass die damit verbundenen Umplanungstätigkeiten den Operator in eine Überforderungssituationen drängen. Um dieser möglichen Überforderung bereits im Vorfeld (*proaktiv*) entgegen zu wirken, wird bereits das Auftauchen dieser Ereignisse zum Anlass für das Anbieten von Unterstützungsleistung genommen.

Neben der situativen Beanspruchungsabschätzung findet sich in *CAMA* auch eine tatsächliche Berücksichtigung des Operators. Dies geschieht anhand des von ihm gezeigten Verhaltens (Abbildung 2.13). Der Begriff des Verhaltens bezieht sich hierbei in erster Linie auf das Verhalten des Flugzeuges, das sich infolge fehlerhafter bzw. unterlassener Aktionen des Piloten ändert, aber auch auf direkte Pilotenhandlungen.

So wird *Piloting Expert (PE)* [Ruckdeschel, 1997] auf Basis des aktuell gültigen Flugplans, der gegenwärtigen Situation, sowie unter Verwendung von normativen und individuellen Pilotenverhaltensmodellen [Stütz, 1999] das zu erwartende Pilotenverhalten für die vorherrschende Situation ermittelt. Dieses erwartete Verhalten des Piloten/Flugzeugs wird im Modul *PIER (Pilot Intent and Error Recognition)*, d.h. Fehler- und Absichtserkennung [Wittig, 1994] [Strohal, 1999], kontinuierlich mit dem tatsächlichen Operator- bzw. dem Flugzeugverhalten verglichen. Erkennt dabei die *PIER* eine Abweichung im Flugzeug-/Operatorverhalten, wird versucht herauszufinden, ob diese Abweichung absichtlich initiiert wurde, oder das Resultat eines Fehlverhaltens darstellt. Hierfür vergleicht die *PIER* die beobachteten Pilotenaktionen (bzw. das Flugzeugverhalten) mit dem aktuellen Missionskontext, sowie mit a-priori hinterlegten Verhaltenshypothesen. Wird hierbei ein Fehler erkannt erfolgt eine gezielte Aufmerksamkeitslenkung. Entspricht das beobachtete Verhalten hingegen einer der im System hinterlegten Absichtshypothesen, wie beispielsweise dem Verhalten bei einem „*Missed Approach*“, oder bei Ausweichen eines Schlechtwettergebietes [Walsdorf und Onken, 1998], wird eine Umplanungsunterstützung angeboten, und die erkannte Absicht dem Operator mitgeteilt.

Bei dieser Art der Berücksichtigung des „Operatorzustandes“ handelt es sich um eine Art der Beanspruchungserkennung, die auf Basis erkannter Fehler auf eine Überforderungssituation des Operators und damit auf einen Unterstützungsbedarf schließt. Gleichzeitig stellt dieser verhaltensbasierte Ansatz, eine erste Umsetzung einer impliziten Kommunikation zwischen Mensch und Assistenzsystem dar, bei der auf Basis einer Verhaltensbeobachtung veränderte, ausgelassene, notwendige Aktionen des Operators vom Assistenzsystem erkannt werden und dieses veränderte Verhalten interpretiert und eingeordnet werden kann. Damit verfügt dieses Assistenzsystem erstmalig über Fähigkeiten, wie sie bisher nur von einem menschlichen Teammitglied bekannt sind.

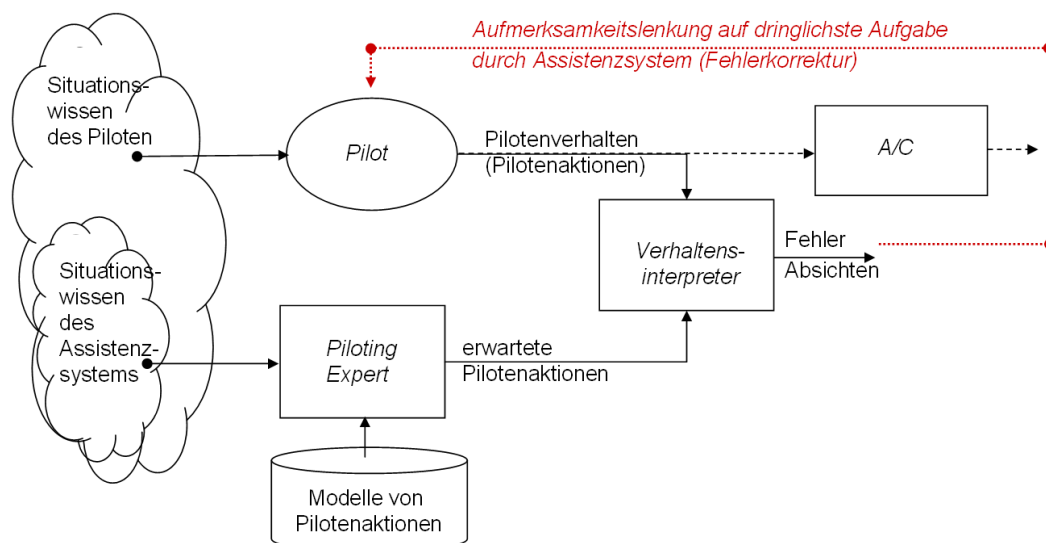


Abbildung 2.13: Einsatz von Verhaltensmodellen in CASSY/CAMA

Die Verwendung von Verhaltensmodellen in CAMA ermöglicht es, Fehler und Absichten des Operators zu identifizieren und zu unterscheiden, führt jedoch in Hinblick auf ein beanspruchungsbaasiertes Eingreifen des Systems zu einer reaktiven Verhaltensweise des Assistenzsystems im Sinne einer Fehler- und Abweichungskorrektur. Die Ursache hierfür liegt in der Betrachtungsweise und Verwendung des Operateurverhaltens. So findet in CAMA Verhalten meist seine Anwendung im Sinne eines Leistungsmaßes der Primäraufgabe (siehe Kapitel 3). Das Hauptaugenmerk liegt hierbei darauf, ob eine Aufgabe/Aktion ausgeführt oder ausgelassen wird und wie genau, im Sinne einer Abweichung, beispielsweise vom aktuellen Flugweg, die aktuelle Aufgabe/Aktion durchgeführt wird. Für diese Art der Erkennung muss der Fehler bzw. die Abweichung jedoch zunächst im Vorfeld eingetreten sein.

Situationstransfer:

CAMA bietet in seiner Realisierung hinsichtlich der in der adaptiven Automation bekannten Begriffswelt sowohl adaptierbare wie auch adaptive Unterstützungsfunktionalitäten an. So ist es dem Operateur möglich unter Nutzung einer multimodalen Benutzerschnittstelle Teilaufgaben, als auch eine vollständige Aufgabenübernahme für Payload-Management-Aufgaben an die Automation zu delegieren [Schulte und Stütz, 1998] (adaptierbare Automation). Adaptiv hingegen erfolgt eine Unterstützung des Operators sowohl in Form verschiedener Automationsgradstufen, als auch durch gezieltes Ausnutzen verfügbarer Interaktionsressourcen des Operators.

Als realisierte Automationsgradstufen für eine adaptive Unterstützung besteht in CAMA die Möglichkeit einer gezielten Aufmerksamkeitslenkung (z.B. im Falle von erkannten Fehlern), das Anbieten mehrerer Lösungsvorschläge (z.B. im Rahmen der Umplanungsunterstützung), sowie die Auswahl bzw. das Anbieten einer einzelnen Lösung (z.B. bei Umplanungen und im Falle einer Ausweichtrajektorie bei gefährlicher Geländeannäherung).

Systemevaluierung:

Ähnlich wie bereits zuvor das Vorgänger-Assistenzsystem CASSY wurde auch CAMA im Rahmen von zwei Simulationskampagnen, sowie zwei Flugversuchskampagnen ausführlich getestet und evaluiert. Ziel war es hier die technische Machbarkeit eines komplexen Crew-Assistenzsystem unter Realflugbedingungen nachzuweisen [Schulte, 2001] [Lenz und Onken, 2000]. Die Evaluierung erfolgte anhand einer technischen Beurteilung des Systems, modulbezogenen Teiluntersuchungen, sowie umfangreichen subjektiven Bewertungen durch die Versuchspersonen. Hierbei zeigte sich, dass die Qualität des Assistenzsystems, bewertet anhand seiner Unterstützung in Form der Aufgabenübernahme, aber auch durch seine Hinweise an die Operateure während der Missionsdurchführung von allen Versuchspersonen als sehr positiv bewertet wurde [Schulte, 2001] [Schulte und Stütz, 1998]. Gleichzeitig gaben die Piloten an, dass das Systemverhalten zu jeder Zeit nachvollziehbar und angemessen war und CAMA als Assistenzsystem einen deutlichen Beitrag zur Steigerung der Flugsicherheit, der Missionseffizienz und der Überlebensfähigkeit im bedrohungsgefährdeten Gebiet leisten konnte [Lenz und Onken, 2000] [Schulte und Stütz, 1998]. Ferner war es CAMA möglich das Situationsbewusstsein der Piloten, insbesondere bezüglich des Flugzustandes, des Geländes, der Bedrohungslage, sowie eines situativ bedingten Umplanungsbedarfs bei den Operateuren zu unterstützen und aufrecht zu erhalten [Schulte und Stütz, 1998].

Resümee:

Assistenzsysteme als elektronische Teammitglieder sind die Voraussetzung für eine sinnvolle, gezielte, operateur orientierte Unterstützung. Um diese damit verbundenen Anforderungen an Assistenzsysteme erfüllen zu können, bedarf es neben entsprechendem Wissen, auch Fähigkeiten, die es ermöglichen, ähnlich wie ein menschliches Teammitglied mit dem Operateur zu interagieren. So erwarten wir beispielsweise von einem menschlichen Teammitglied die Fähigkeit, dass dieses Aufgaben übernehmen kann, aber auch selbständig erkennt, wann es diese Aufgaben eigeninitiativ übernehmen soll. Hierbei handelt es sich um eine Fähigkeit, über die bisher ausschließlich Menschen verfügen. Sie gilt es zukünftig auch Assistenzsystemen zu übertragen. Diese Fähigkeiten

finden sich bereits in der in der zweiten Grundforderung an Assistenzsysteme, und unter dem Begriff der adaptiven Automation. Essentiell ist hierbei nicht nur die Beantwortung der Frage, wie ein derartiges System den Menschen unterstützen kann, sondern vielmehr die Erkennung des richtigen bzw. notwendigen Zeitpunktes dafür. Die hier aufgeführten Assistenzsysteme wie COGPIT, RPA und CAMA adressieren bereits diese Herausforderung, in dem sie für die Bestimmung dieses Zeitpunktes auf verschiedene Erfassungsmethoden der Operateurbeanspruchung zurückgreifen. Diese Methoden sollen im folgenden Kapitel detaillierter betrachtet werden. Ziel ist es hierbei, neben ihren zugrunde liegenden Annahmen, ihre Vorzüge, aber auch Einschränkungen vor dem Hintergrund einer kontinuierlichen Beanspruchungserfassung und Überforderungserkennung des menschlichen Operateurs zu diskutieren.

Kapitel 3

Methoden zur Erfassung der Operateurbeanspruchung

Assistenzsysteme sollen den Menschen unterstützen, wenn dieser im Rahmen der Aufgabenbearbeitung überfordert ist. Diese auf den ersten Blick trivial klingende Forderung adressiert bei genauerer Betrachtung eine (technische) Herausforderung für die es bis heute keine zufrieden stellende Lösung gibt. Das folgende Kapitel soll sich daher den Herausforderungen der Umsetzung dieser Anforderung widmen.

Aus kognitionswissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Sicht sind mit dieser Anforderung zwei weitere grundlegende Fragestellungen verbunden, die es zu beantworten gilt:

- *Was ist Überforderung?*
- *Welche Möglichkeiten existieren für ein technisches System (Assistenzsystem) um die Überforderung eines Menschen/Bedieners zu erkennen?*

Für die Beantwortung dieser Fragestellungen wird im Folgenden zunächst der Begriff der Überforderung adressiert und seine Einbettung in den Kontext des Begriffs der Beanspruchung dargestellt (vgl. Kapitel 3.1). Da für den Begriff der Beanspruchung noch keine einheitlich akzeptierte Definition existiert und bestehende Definition hierfür oftmals auf andere Konstrukte wie Leistung und Belastung zurückgreifen, sollen in Kapitel 3.2, die Begrifflichkeiten Belastung, Beanspruchung und Leistung unter Verwendung des Konzeptes von [Rohmert, 1984] voneinander abgegrenzt und pauschale Zusammenhänge der einzelnen Größen aufgezeigt werden. Komplettiert wird dieses Kapitel mit einer Übersicht über die verschiedenen Ansätzen bzw. Methoden zur Erfassung der Operateurbeanspruchung (Kapitel 3.3).

3.1 Überforderung - ein Teil der Beanspruchung

Der Begriff der Überforderung, oftmals auch synonym bezeichnet als „*workload-redline*“ [deWaard, 1996] [Colle und Reid, 2005] [Gier u. a., 2008], definiert einen *Bereich*, in dem es dem Menschen nicht mehr längerfristig möglich ist, seine Leistung im Rahmen der Aufgabenerfüllung aufrecht zu erhalten. In diesem Bereich übersteigen die Anforderungen der Aufgabe und die vom Operateur kompensatorische Aufwendung von Anstrengung (*effort*) seine nur limitiert vorhandenen Kapazitäten [Young und Stanton, 1987]. Bezieht sich der Begriff der Kapazität auf die im Rahmen

der Aufgabenerfüllung benötigten mentalen Verarbeitungsressourcen des Operators, so kann nach [Kerkau, 2005] die Nutzung der Kapazität mit dem Begriff der mentalen Beanspruchung gleichgesetzt werden.

Der Begriff der Überforderung bezeichnet folglich einen nicht klar abgrenzbaren Bereich der (mental) Beanspruchung des Operators. Damit ein Assistenzsystem in der Lage ist, die Überforderung eines Operators identifizieren zu können, muss es demnach nicht nur die Beanspruchung eines Operators erkennen können. Vielmehr muss es in der Beanspruchung des Operators diesen unklar abgegrenzten Bereich in der Nähe der Leistungsgrenze des Operators identifizieren können.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Beanspruchung selbst. So stellt die (subjektive) Beanspruchung eines Menschen ein *komplexes, multidimensionales, psychologisches Konstrukt* dar, das die gesamte (mentale) Reaktion des Menschen auf eine Aufgabensituation widerspiegelt. Diese Reaktion resultiert aus einer ebenfalls multidimensionalen Belastungssituation und wird beeinflusst durch eine Vielzahl individueller Faktoren, wie beispielsweise Motivation, Fertigkeiten, Fähigkeiten, Erfahrungen und Tagesverfassung.

Da die Beanspruchung ausschließlich subjektiv durch den Menschen empfunden wird, entzieht sie sich einer direkten Messbarkeit. Um dennoch eine Aussage über die Beanspruchung von Operateuren zu erhalten, versuchen verschiedene Ansätze (vgl. Kapitel 3.3) über andere, messtechnisch beobachtbare Parameter eine Aussage über die Beanspruchung von Operateuren zu erhalten. Dabei suggerieren diese Ansätze häufig implizit, dass sich die Beanspruchung eines Menschen, abhängig von der verwendeten Methodik, durch eine oder mehrere skalare, kontinuierliche oder ordinale Maßzahl erfassen und beschreiben lässt. Dies ist jedoch, unter Berücksichtigung der Multidimensionalität und der Vielzahl an möglichen Einflussfaktoren, stark zu bezweifeln.

Neben ihrer Subjektivität und der nicht eingrenzenden Anzahl an Faktoren, die eine Auswirkung auf die Beanspruchung besitzen, scheint ein weiteres Problem, sich diesem Konstrukt zu nähern, bereits bei der Definition des Begriffes zu liegen. So existiert eine Reihe an verschiedenen Definitionen für den Begriff der Beanspruchung, jedoch keine universell akzeptierte Definition. Die Ursache hierfür scheint die Uneinigkeit hinsichtlich des zugrunde liegenden Konzeptansatzes zu sein, der entweder als aufmerksamkeitstheoretisch oder aktivierungstheoretisch betrachtet wird [Hancock u. a., 1995] [Meshkati, 1998] [Cain, 2007]. Es zeigt sich folglich, dass die bisherigen Definitionsansätze oftmals die verschiedenen Sichtweisen widerspiegeln, mit denen versucht wird, eine Aussage über die Zusammenhänge, Ursachen und Auswirkungen dieses Phänomens zu geben [Fink u. a., 2003]. Viele Definitionen orientieren sich daher an dem Aufwand, den Kosten oder notwendigen Ressourcen, die ein Operateur zur Erfüllung einer bestimmten Aufgabe in einer gegebenen Belastungssituation, oder aber zur Erreichung eigener Zielvorstellungen, aufwenden muss.

So beschreiben [Gopher und Donchin, 1986] Beanspruchung („workload“) als

„... a mental construct, a latent variable, or perhaps an „intervening variable“ reflecting the interaction of mental demands imposed on operators by tasks they attend to.“

[Hart und Wickens, 1990] sehen Beanspruchung („workload“) als

„... a general term used to describe the cost of accomplishing task requirements for the human element of man-machine system. The cost may be manifested as subjective discomfort, behavioural response capabilities, or physiological reactions.“

[Hart und Staveland, 1988] beschreiben den Begriff der Beanspruchung unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussfaktoren wie folgt

„Workload is not an inherent property, but rather it emerges from the interaction between the requirements of a task, the circumstances under which it is performed, and the skills, behaviours, and perceptions of the operator.“

Unter Berücksichtigung der für die Aufgabenerfüllung benötigten Aufmerksamkeitszuteilung bzw. Aufmerksamkeitsressourcen finden sich entsprechende Definition von [Kantowitz, 2000] und [Young und Stanton, 2001]. Sie beschreiben die mentale Beanspruchung als

„... an intervening variable that, like attention, modulates allocation of the human’s information processing resources to task demands.“[Kantowitz, 2000]

„... the level of attentional resources required to meet both objective and subjective performance criteria, which may be mediated by task demands, external support, and past experience.“[Young und Stanton, 2001]

Alle diese Definitionen zeigen eine wesentliche Gemeinsamkeit. Sie versuchen den Begriff der Beanspruchung oftmals unter zu Hilfenahme weiterer Begrifflichkeiten wie beispielsweise der *Taskload* (Belastung) oder aber der *Performance* (Leistung) des Operateurs zu beschreiben. Dadurch kommt es zu einer Mischung verschiedener Konzepte, die eine klare Trennung von Ursachen, Ausprägungen und Auswirkungen des Konzepts erschwert.

Da die Begrifflichkeiten Belastung, Beanspruchung und Leistung in dieser Arbeit substantiell sind, werden diese im Folgenden definitorisch klar abgegrenzt. Hierfür wird die Taxonomie von [Rohmert und Rutenfranz, 1975] [Rohmert, 1984] verwendet, die aus arbeitspsychologischer Sicht eine vergleichsweise klare, neutrale Abgrenzung der Begrifflichkeiten *Belastung (taskload)*, *Beanspruchung (subjective workload)* und *Leistung (performance)* auf Basis von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen vorsieht.

3.2 Definitionen, Abhängigkeiten und Zusammenhänge: Belastung-Beanspruchung-Leistung

Nach [Rohmert, 1984] stellt die Beanspruchung eines Menschen die individuelle, unmittelbare Auswirkung der Belastung dar. Diese wird durch individuelle Vorraussetzungen (z.B. Training, Erfahrung) und innere Zustände des Operateurs (z.B. Motivation) beeinflusst und resultiert letztlich in einer beobachtbaren Leistung des Operateurs (vgl. Abbildung 3.1).

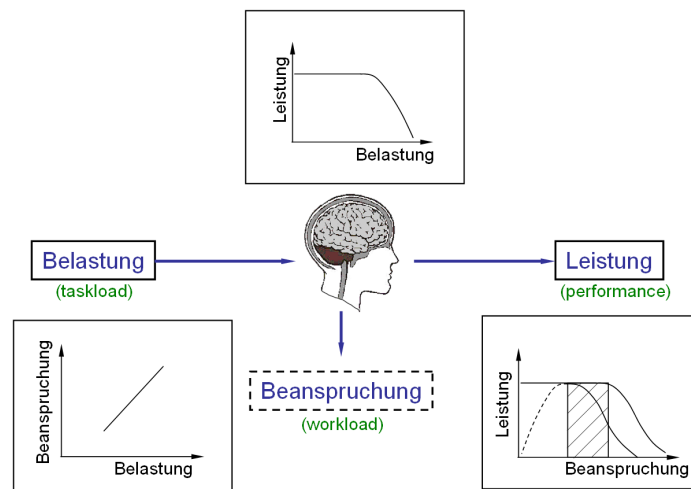


Abbildung 3.1: Belastung-Beanspruchungskonzept [Rohmert, 1984] erweitert um pauschale Abhängigkeiten der einzelnen Größen

Der Begriff der **Belastung** bezieht sich auf die Gesamtheit aller erfassbaren, physisch (*physikalisch*) und psychisch (*informativ*) auf den Menschen einwirkenden Faktoren. Betrachtet am Arbeitssystem, setzt sich diese Belastung im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen zusammen (vgl. Abbildung 3.2):

- *Arbeitsauftrag (Arbeitsziel)*
Definiert durch den Arbeitsauftrag besteht die Arbeitsaufgabe des Operateurs aus einer Vielzahl an einzelnen, sequentiellen und parallelen, abhängigen und unabhängigen Tätigkeiten. Die Intensität dieser Belastung resultiert aus der Aufgabe als Ganzes, der Aufgabendauer, der Aufgabenkomplexität, sowie aus aufgabenspezifischen Randbedingungen (z.B. Zeitvorgaben).
- *Umgebungsbedingungen*
Diese umfassen die vom Operateur aufzunehmende und zu verarbeitende Informationen, sowie die vorherrschenden Bedingungen im Arbeitsumfeld (z.B. Lärm, Licht, Temperatur, Vibrationen). Sie wirken damit psychisch wie auch physisch auf den Operateur ein.
- *Interaktion mit den OSMs/dem Assistenzsystem*
Entscheidend ist hier der Informationsfluss (z.B. bereitgestellte Sensor-Informationen der UAVs, Meldungen/Hinweise des Assistenzsystems).

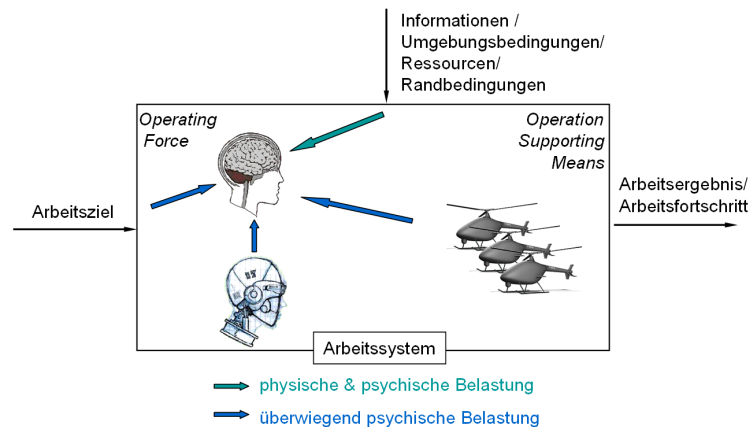


Abbildung 3.2: Anteile der Belastung, die auf den Menschen im Arbeitssystem einwirken

Die **Leistung** eines Operators spiegelt das Resultat der auf den Operateur wirkenden Belastung und der dabei empfundenen Beanspruchung wider. Während unter Leistung prinzipiell alle vom Operateur durchgeführten und messtechnisch erfassbaren Handlungen zu verstehen sind, so findet doch meist eine Fokussierung auf die messbare Leistung des gesamten Mensch-Maschine-Systems statt (vgl. Abbildung 3.3). Kriterien, die klassischerweise als Maß für Leistung eines Operators herangezogen werden, sind Fehlerhäufigkeiten, Reaktionszeiten, aber auch Genauigkeiten von Reaktionen [Johannsen, 1993].

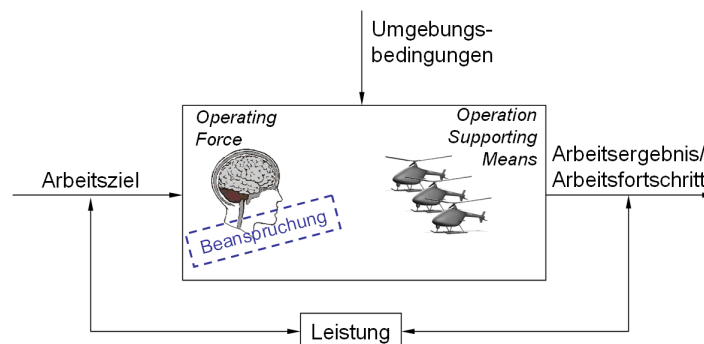


Abbildung 3.3: Leistung des Operators am Beispiel des Arbeitssystems

Neben der gegenseitigen Abgrenzung der Begrifflichkeiten Belastung, Beanspruchung und Leistung sind ferner die groben Zusammenhänge der einzelnen Größen zu betrachten. Sie sind insbesondere im Hinblick auf ein späteres Experimental Design (vgl. Kapitel 5) von Interesse, bei dem es darum geht, den Operateur gezielt in eine Überforderungssituation zu bringen, und die Auswirkung in Form von beobachtbaren Parametern (z.B. Leistung) zu erfassen.

Unter der massiv simplifizierenden Annahme, dass diesen Begriffen quantitative Skalen zugeordnet werden können (schwache/starke Belastung, niedrige/hohe Beanspruchung, schlechte/gute Leistung), lassen sich pauschale Zusammenhänge zwischen diesen, für den Augenblick auf eindimensionale Skalen abgebildeten, Konzepten beschreiben. Die vereinfachten Zusammenhänge sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Dabei sei explizit darauf hingewiesen, dass hierbei die Mutidimensio-

nalität und Komplexität der beteiligten Konzepte ignoriert wird, die per se eine Auftragung der einen Größe über der anderen verbieten. Ferner muss klar sein, dass auch eine messtechnische Erfassung im Sinne kontinuierlich skalierbarer Größen für die Konzepte Belastung, Beanspruchung und Leistung im Allgemeinen nicht machbar und sinnvoll ist. Dennoch sollen die intuitiven und häufig in der Literatur strapazierten Zusammenhänge im Folgenden diskutiert werden.

Zusammenhang zwischen Belastung und Beanspruchung: Eine im Rahmen von experimentellen Designs oftmals getroffene Annahme ist, dass ein Anstieg der Belastung in einem Anstieg der Beanspruchung resultiert [O'Donnel und Eggemeier, 1986]. So bemerken [Parasuraman und Hancock, 2000]: „Generally, we expect that the operator's mental workload is related to task load, such that the higher the task load, the higher the operator's mental workload is likely to be.“ Basierend auf dieser Annahme wird daher häufig der Zusammenhang vereinfacht als linear dargestellt, auch wenn natürlich zu bemerken ist, dass es sich sowohl bei der Beanspruchung, als auch der Belastung, um komplexe, multidimensionale Größen handelt, deren Zusammenhang sicherlich nicht hinreichend als eindimensional und linear beschrieben werden kann.

Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Leistung: Nach [O'Donnel und Eggemeier, 1986], [Lysaght u. a., 1989a] und [Veltman und Jansen, 2003] weisen die Größen Beanspruchung und Leistung (vgl. Abbildung 3.4) einen annähernd umgekehrt U-förmigen Zusammenhang auf. Abgeleitet aus diesem Verlauf ergibt sich, dass ein Mensch seine optimale Leistungsfähigkeit in einem Bereich moderater Beanspruchung erreichen kann. [Veltman und Jansen, 2003] bemerken, dass der Operateur in diesem Bereich nur geringer Anstrengung bedarf, um eine hohe Leistung aufrecht zu erhalten. In Situationen hoher Beanspruchung muss der Operateur hingegen zusätzliche Anstrengung (effort) investieren, um weiterhin ein hohes Leistungsniveau beizubehalten. Steigt die Beanspruchung des Operateurs infolge der Belastungssituation (z.B. durch zeitliche Aufgaben/Missionsrandbedingungen, die Arbeitsmenge, repräsentiert durch die Anzahl parallel abzuarbeitender Tätigkeiten, infolge der Aufgabenkomplexität, oder aber aufgrund einer offenen/unklaren Aufgabenstellung) weiter an, gerät der Operateur in eine Überbeanspruchungssituation, in der er nicht mehr in der Lage ist, durch weitere Anstrengung seine optimale Leistung aufrecht zu erhalten. Es kommt zu einem Absinken der Leistung des Operateurs.

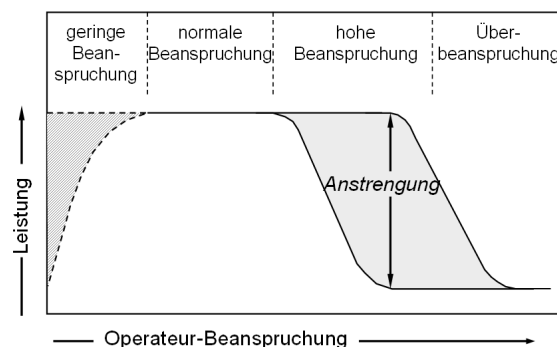


Abbildung 3.4: Schematischer Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Leistung eines Operateurs (in Anlehnung an [O'Donnel und Eggemeier, 1986])

In Situationen geringer Beanspruchung (Unterforderungssituation) hingegen reicht bereits wenig Anstrengung aus, um eine hohe Leistung zu erzielen [Veltman und Jansen, 2003]. Trotz dieses nur geringen zu treibenden Aufwands kann es auch in diesem Beanspruchungsbereich zu einem Leistungsabfall des Operateurs kommen [Lysaght u. a., 1989b]. Hervorgerufen werden diese Lei-

stungseinbrüche oftmals als Folge von Langeweile und Gleichgültigkeit. Diese ist nicht selten Resultat monotoner Routinetätigkeiten, die zu einer geringen Auslastung des Operators und damit oftmals verbunden zu einer Nichtnutzung seiner Fertigkeiten und Fähigkeiten führen. Diese kann nach [Parasuraman, 1986] dazu führen, dass der Operateur Signale oder Instruktionen übersieht, die letztendlich in einer reduzierten Leistung des Operators und damit des Gesamtsystems resultieren.

Zusammenhang zwischen Belastung und Leistung: Für den Zusammenhang zwischen Belastung und Leistung wird ein ähnlicher Verlauf angenommen, wie zwischen den Größen Beanspruchung und Leistung. Mit steigender Belastung lässt sich über einen gewissen Bereich eine Konstanz der Leistung des Operators beobachten [Parasuraman u. a., 2008]. So konstatieren [Hilburn und Jorna, 2001]: „... *task load fluctuations are not necessarily reflected in observable performance changes*“. Zurückzuführen ist diese Aufrechterhaltung der Performanz auf ein bereits von [Sperandio, 1971] beobachtetes und dokumentiertes Phänomen, dass Operateure „... *can marshal a variety of idiosyncratic strategies to maintain task performance in the face of changing task demands*“. Dieses Phänomen beschreibt im Wesentlichen eine Anpassung des Operateurverhaltens zur Aufrechterhaltung der Performanz, das im Verlauf dieser Arbeit mit dem Begriff der selbstadaptiven Strategien bezeichnet und weiter untersucht werden wird (vgl. Kapitel 4.1). Dieses Konzept stellt einen zentralen Aspekt der vorliegenden Arbeit dar.

3.3 Rückschluss auf Operateurbeanspruchung - verschiedene Ansätze

Da es sich bei der Beanspruchung um ein subjektives Maß handelt, das messtechnisch nicht direkt erfassbar ist, wird für gewöhnlich versucht mit Hilfe anderer, beobachtbarer Parameter einen Rückschluss auf die Operateurbeanspruchung zu gewinnen. So präzisieren [Casali und Wierwille, 1984] in diesem Zusammenhang:

„Workload cannot be directly observed, it must be inferred from observation of overt behavior or measurement of psychological and physiological processes.“

Hierbei wird die Annahme getroffen, dass die im Rahmen der einzelnen Verfahren verwendeten Parameter in der Lage sind, die Beanspruchung eines Menschen zu reflektieren. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Methoden bzw. Ansätze in der Regel nur einen bestimmten Gesichtspunkt des komplexen Phänomens Beanspruchung widerspiegeln, da sie nur eine bestimmte Reaktion des menschlichen Operators auf die aktuelle Belastungssituation mit Hilfe der jeweiligen Messmethode erfassen können. So betonen [Casali und Wierwille, 1984] und [Cain, 2007], dass eine definitive Messung der Operateurbeanspruchung allein infolge der Vielzahl an beeinflussenden Faktoren schwierig ist.

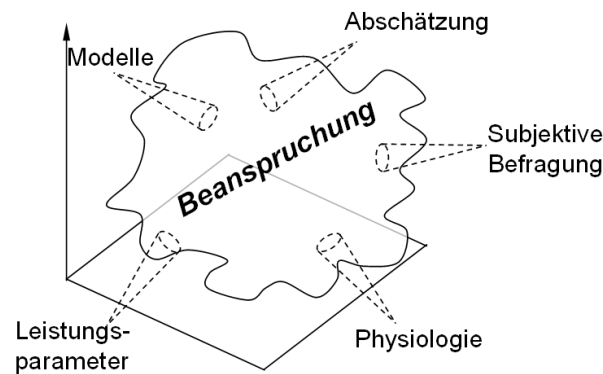


Abbildung 3.5: Operateurbeanspruchung - Ein multidimensionales Konstrukt

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze dargestellt, die versuchen, durch ihre Sichtweise und unter Verwendung verschiedener Annahmen, einen Rückschluss auf die aktuelle Beanspruchung des Operators zu erhalten (vgl. Abbildung 3.5). Sie finden oftmals entweder einzeln oder in Kombinationen (*Hybride Systeme* [Scallen und Hancock, 2001] [Parasuraman, 1986]) in Experimenten, aber auch in prototypisch realisierten Systemen, Anwendung.

Zur Veranschaulichung der einzelnen Methoden wird hier eine graphische Darstellung verwendet, die sich an dem Ursache-Wirkungsprinzip nach [Rohmert, 1984] orientiert. Sie ermöglicht es, auf den ersten Blick zu erkennen, in welchem Maß (im Sinne eines *Feed-Forward* bzw. *Feed-Back Schlusses*) eine Berücksichtigung des Operators im Rahmen der Methodik stattfindet. Unterschieden wird hierbei, eine

- ausschließliche Berücksichtigung der Eingangsgrößen (Belastung) (*Feed-Forward*) nicht jedoch des Operators (weder Operateurzustand, -leistung, noch modellbasiert) (Abbildung 3.6, dargestellt als schwarze, kreisförmige Rückführung)
- lediglich modellbasierte Berücksichtigung des Operators (*Feed-Forward*) (Abbildung 3.6, orange dargestellt)
- Berücksichtigung des Operateurzustandes, bzw. direkter Aussagen des Operators (*Feed-Back*) (Abbildung 3.6, blau dargestellt)
- Berücksichtigung von gemessenen Leistungs- bzw. Verhaltensparametern des Operators im Umgang mit dem System (*Feed-Back*) (Abbildung 3.6, grün dargestellt)

Gleichzeitig ermöglicht diese Darstellung die Visualisierung einer potentiellen *closed-loop* Fähigkeit der einzelnen Verfahren (Abbildung 3.6, violett dargestellt), die insbesondere vor dem Hintergrund einer Verwendung in Assistenzsystemen und der hierfür erforderlichen kontinuierlichen Erfassung des Operateurbeanspruchungszustandes von Bedeutung ist. Hier wird also die Eignung des jeweiligen Verfahrens untersucht, um daraus Rückschlüsse für eine Modifikation der Belastung im Sinne adaptiver Automation abzuleiten. Ermöglicht ein Verfahren hingegen keine zeitlich durchgehende, sondern lediglich eine gelegentliche Erfassung der Operateurbeanspruchung, ist dies durch ein Kreuz in der Rückführung von dem Beanspruchungsrückschluss auf die Belastung gekennzeichnet.

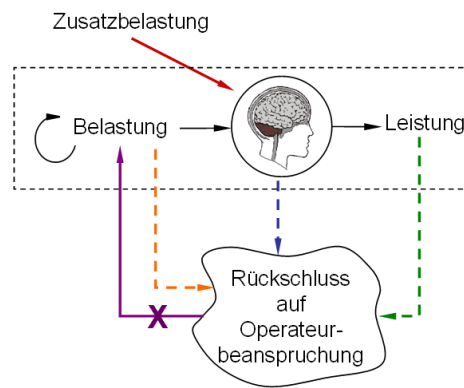


Abbildung 3.6: Schema zur Darstellung der unterschiedlichen Ansätze bzw. Methoden zur Erfassung der Operateurbeanspruchung

3.3.1 Fragebogenmethoden

Mit Hilfe von Fragebögen (Bewertungsskalen) wird versucht, die vom Operateur empfundene Beanspruchung für eine erlebte Situation retrospektiv zu erfassen [Johannsen, 1993]. Hierbei handelt es sich um ein subjektives Verfahren (Abbildung 3.7). Grundlegende Annahme bei der Verwendung von Fragebögen ist, dass der Operateur bei Vorliegen einer gewissen Beanspruchung diese auch tatsächlich bewusst reflektieren kann.

Subjektive Verfahren lassen sich unterteilen in eindimensionale Skalen (z.B.: *POSWAT* - Pilot Objective/Subjective Workload Assessment Technique), mehrdimensionale Skalen (z.B.: *SWAT* - Subjective Workload Assessment Technique, *NASA-TLX* - NASA Task Load Index), und hierarchische Skalen (z.B.: *CHQR* - Cooper Harper Handling Qualities Rating Scale) [Grandt, 2004].

Während eindimensionale Skalen lediglich die Höhe bzw. Intensität der Beanspruchung widerspiegeln, ermöglichen mehrdimensionalen Skalen zusätzlich eine Differenzierung bezüglich der Quelle bzw. der Ursache der Beanspruchung. Im Gegensatz zu den eindimensionalen Verfahren bedingt dieser zusätzliche Informationsgewinn jedoch eine gesteigerte Komplexität, sowie einen erhöhten Zeitbedarf für die Befragung der Versuchspersonen. [Kerkau, 2005] kritisiert im Zusammenhang mit mehrdimensionalen Verfahren, dass diese eine Unterscheidung zwischen körperlicher und mentaler Beanspruchung, nicht jedoch eine Differenzierung von Wahrnehmung und zentraler Verarbeitung ermöglichen.

Vorteile des Verfahrens:

Subjektive Verfahren (Fragebögenmethoden) zeichnen sich durch ihre leichte Realisierbarkeit, eine im Allgemeinen hohe Akzeptanz bei Versuchspersonen, sowie durch einen nur geringen Kostenaufwand aus. Infolge dieser Vorteile und ihrer leichten, unkomplizierten Anwendbarkeit stellen sie eine der am häufigsten verwendeten Methoden zur Beanspruchungserfassung dar.

Einschränkungen/Nachteile des Verfahrens:

Essentieller Nachteil des Verfahrens ist ihre lediglich punktuelle Erfassung der Operateurbeanspruchung [Kerkau, 2005]. Sie schließt eine Verwendung dieser Methodik im Rahmen von Assistenzsystemen bereits im Vorfeld aus, kann jedoch als Mittel zur Modellerstellung bzw. Modellevaluierung verwendet werden.

Wird die Beanspruchung von Operateuren mit Fragebögen erfasst, bedingt dies zwangsweise eine Störung des Arbeitsprozesses. Ursache hierfür ist, dass der Operateur für die Bearbeitung des

Fragebogens kurzzeitig, aber dennoch vollständig aus seinem Aufgabenkontext herausgelöst wird und nach Ausfüllen des Bogens erst wieder zurück in den Situationskontext finden muss. Um diese Intrusion möglichst gering zu halten, werden Fragebögenmethoden häufig nur am Ende eines Experiments angewendet. Hier stellt sich jedoch die Frage, für welchen zurückliegenden Zeitraum der Operateur überhaupt eine subjektive Bewertung abgeben kann. Dieser ist weder klar bestimmbar, noch eingrenzbar. Auch besteht die Möglichkeit, dass sich die Versuchsperson nicht mehr an den gesamten, zurückliegenden Zeitraum erinnern kann, oder ihr die Beanspruchung während der Aufgabenbearbeitung unter Umständen nicht bewusst geworden ist [Tsang und Wilson, 1997].

Eine weitere Einschränkung dieser Methodik ergibt sich aus seiner Subjektivität. So können bei Beantwortung der Bögen verfälschte Bewertungen durch den Operateur als Folge von Antworttendenzen, Irrtümern, persönlichen Einstellungen, zufälligen Ankreuzens, bewussten zuwider Handelns oder niedriger Motivation auftreten [Grandt, 2004]. Ferner weisen [Wickens und Hollands, 2000] auf die Problematik subjektiver Beanspruchungseinschätzung im Falle von Mehrfachaufgaben hin. So werden zwei leichte Aufgaben, die problemlos parallel bearbeitet werden können, oftmals als schwieriger eingeschätzt, als eine schwierige Aufgabe, deren Bearbeitung misslingt.

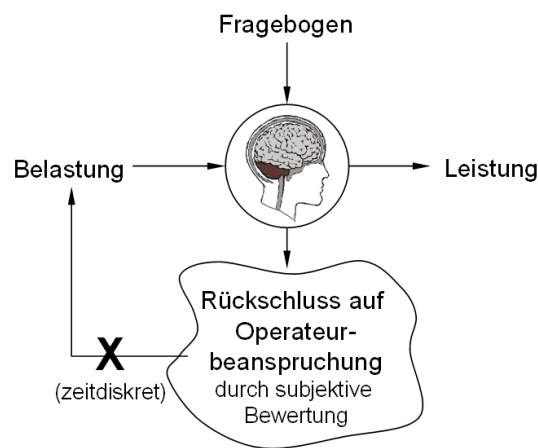


Abbildung 3.7: Verwendung von Fragebögen zur Erfassung der Operateurbeanspruchung

3.3.2 Leistung in der Hauptaufgabe

Dieses Verfahren, auch bezeichnet als *Primär- oder Hauptaufgabenmaß*, beruht auf der Verwendung beobachtbarer Leistungsdaten, die im Rahmen der Aufgabenbearbeitung durch die Versuchsperson in der Primäraufgabe erhoben werden können. Mit Hilfe dieser Leistungsmaße wird versucht einen Rückschluss auf die Beanspruchung des Operateurs bei der Bearbeitung einer Aufgabe zu erhalten (Abbildung 3.8). Grundlegende Annahme hierbei ist, dass eine Korrelation zwischen den beobachtbaren Performanzwerten und der Beanspruchung des Operateurs existiert und damit als direkter Indikator verwendbar ist [Gopher und Donchin, 1986]. Performanzmaße, die typischerweise bei dieser Methodik Verwendung finden, sind beispielsweise erkannte Fehler, Abweichungen (z.B. bezogen auf die Genauigkeit der Aufgabenausführung oder mögliche Zeitvorgaben), sowie die benötigte Zeit zur Ausführung der Aufgaben [Johannsen, 1993]. Nach [O'Donnel und Eggemeier, 1986] kann beim Hauptaufgabenmaß zwischen dem *Einzel-Hauptaufgabenmaß* und dem *Mehrfach-Hauptaufgabenmaß* unterschieden werden.

Der Ansatz des *Einzel-Hauptaufgabenmaßes* sieht die Betrachtung von nur einem einzelnen Leistungsparameter, wie beispielsweise die Anzahl auftretender Fehler, oder die Variation der Aufgabenausführungsgeschwindigkeiten vor. Entsprechende Maßzahlen werden dann direkt als Indikator für die Beanspruchung des menschlichen Operateurs herangezogen.

Mehrfach-Hauptaufgabenmaße werden vorwiegend im Rahmen eines ersten Auswahlprüfverfahrens verwendet, mit dem Ziel die Sensitivität der Methode zu steigern. Hierbei werden mehrere Aspekte der Leistung (z.B. Leistung und Verzögerungsdaten) betrachtet.

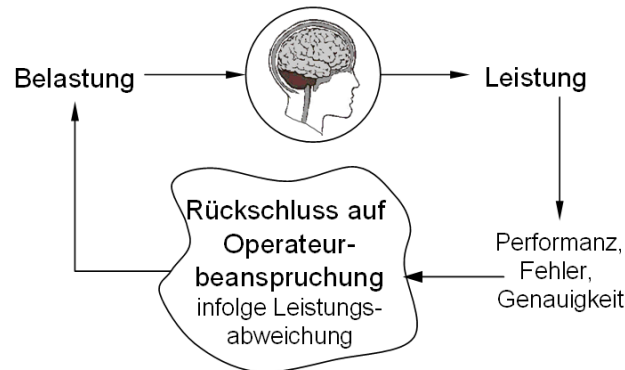


Abbildung 3.8: Rückschluss auf unzulässige Operateurbeanspruchung infolge Abweichungen in der Performanz

Vorteile des Verfahrens:

Wesentliche Vorteile dieses Ansatzes zeigen sich darin, dass die Leistung in der Regel kontinuierlich und intrusionsfrei erfasst werden kann und daher eine hohe Akzeptanz, sowie eine Augenscheinvalidität beim Operateur vorhanden sind.

Einschränkungen/Nachteile des Verfahrens:

Einschränkende Faktoren hingegen finden sich beispielsweise in der nur geringen Sensitivität des Hauptaufgabenmaßes. So eignet sich dieses Maß nach [O'Donnel und Eggemeier, 1986] ausschließlich um sehr hohe Beanspruchung beziehungsweise Überforderung des Operateurs durch Fehlererkennung nachzuweisen. Ferner ist es mit dieser Methodik nicht möglich, die Quelle oder die Ursache der Operateurbeanspruchung zu ermitteln (fehlende Diagnostizität). Nach [Scerbo u. a., 2001] liegt die entscheidende Einschränkung dieser Methodik jedoch darin, dass sie ausschließlich reaktiv ausgeprägt werden kann, d.h. dass ein Eingreifen des Systems (z.B. eines Assistenzsystems) erst nach erkanntem Fehlverhalten oder identifizierter Abweichung vom gewünschten Leistungsniveau möglich ist.

Ferner zeigt die Verwendung des Hauptaufgabenmaßes in „*supervisory-control*“ Aufgaben nur eine bedingte Eignung, da diese Aufgaben durch gelegentliche Interaktion des Operateurs mit dem System charakterisiert sind und folglich mögliches Fehlverhalten oder abweichendes Verhalten nur schwer kontinuierlich zu beobachten sind.

3.3.3 Leistung in Nebenaufgaben

Dieses Verfahren sieht zunächst eine gezielte Belastungsveränderung des Operateurs durch Hinzufügen einer Nebenaufgabe (z.B. Gedächtnis-, Überwachungs-, Trackingaufgaben, Kopfrechnen, Zeitabschätzungen) zu seiner eigentlichen Aufgabe, der Primäraufgabe, vor (Abbildung 3.9). Die Beanspruchung des Operateurs, die dieser während der Bearbeitung der Primäraufgabe erfährt, wird hierbei aus der Leistung des Operateurs in der Nebenaufgabe (*Subsidiary Task Paradigm*) [O'Donnel und Eggemeier, 1986] ermittelt. Diese Methodik ermittelt folglich die noch verfügbare Restkapazität des Operateurs in der Primäraufgabe, die ein Maß für die Beanspruchung des Operateurs im Rahmen der Aufgabenbearbeitung in der Primäraufgabe darstellt. Hierbei bedient sich die

Methodik der Annahme, dass der Mensch nur über limitierte Ressourcen verfügt, die bereits zum Teil durch die Bearbeitung in der Primäraufgabe in Anspruch genommen wurden. Ein zentraler Aspekt bei der Verwendung von Nebenaufgaben stellt die Wahl der Nebenaufgabe dar. Diesbezüglich gilt es zu differenzieren, ob es sich bei der verwendeten Nebenaufgabe um so genannte eingebettete, oder um künstliche Nebenaufgaben handelt. Eingebettete Nebenaufgaben sind typischerweise Aufgaben, die sich im Arbeitsumfeld des Operateurs wieder finden. Im fliegerischen Umfeld eignen sich nach [Shingledecker und Crabtree, 1982] hierfür insbesondere Nebenaufgaben wie Funkkommunikation oder die Bearbeitung von Systemausfällen, welche hier allerdings nur zum Zweck der Beanspruchungsbestimmung an die Versuchspersonen heran getragen werden. Derartige Aufgaben werden vom Operateur (Pilot) nicht als unnatürlich oder kontextfremd empfunden und interferieren somit nur wenig mit der Primäraufgabe. Externe bzw. künstliche Nebenaufgaben, wie beispielsweise Rechenaufgaben, haben im Allgemeinen keinen Bezug zur Hauptaufgabe und können daher zu einer Interferenz mit der Hauptaufgabe in Sinne einer Störung führen.

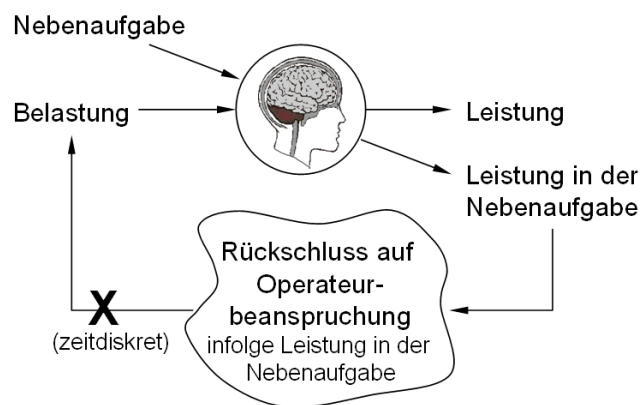


Abbildung 3.9: Verwendung von Nebenaufgaben, um einen Rückschluss auf die Operateurbeanspruchung zu erhalten

Vorteile des Verfahrens:

Parallel abzuarbeitende Aufgaben, hier gezielt getriggert durch die Verwendung von Nebenaufgaben, sind prinzipiell für Operateure nichts ungewöhnliches, so dass es Operateure gewohnt sind, die Leistung einer Aufgabe auf Kosten einer anderen aufrecht zu erhalten. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer gewissen Realitätsnähe des Verfahrens, jedoch nur, wenn es sich bei der verwendeten Nebenaufgabe um eine eingebettete Aufgabe handelt.

Werden hingegen künstliche Nebenaufgaben verwendet, reduziert sich die Realitätsnähe. Gleichzeitig ermöglichen diese Nebenaufgaben eine gezielte Stimulation von spezifischen Ressourcen wodurch es ihnen möglich ist, diagnostische Informationen, über die noch zur Verfügung stehenden Ressourcen des Operateurs (z.B. Wahrnehmungsressourcen, motorische Ressourcen) wider zu spiegeln [Rehmann, 1995].

Einschränkungen/Nachteile des Verfahrens:

Die Einschränkungen des Verfahrens liegen in erster Linie bei den verwendeten Nebenaufgaben. Hier bedarf es großer Achtsamkeit. So besteht nach [Tsang und Wilson, 1997] beispielsweise die Gefahr, dass durch eine unglückliche Auswahl der Nebenaufgabe eine andere Dimension der Beanspruchung adressiert oder gar Ressource belastet wird und folglich eine bereits hohe Beanspruchung in der Primäraufgabe unerkannt bleibt. Auch können Nebenaufgaben, insbesondere künstliche, die eine deutlich höhere Intrusion des Operateurs zur Folge haben, dazu führen, dass die Versuchsperson ihre Aufmerksamkeit von der Primäraufgabe abwendet und diese der eigentlich untergeordneten und nur zum Zweck der Messung eingeführten Nebenaufgabe zuwendet.

Ferner spielt auch die Ausprägung der Nebenaufgabe eine wichtige Rolle. Handelt es sich hierbei beispielsweise um zeitdiskrete Nebenaufgabe ist auch der Rückschluss auf die Beanspruchung nur zu diskreten Zeitpunkten möglich. Stellt die Nebenaufgabe hingegen eine kontinuierlich Aufgabe wie z.B. Trackingaufgaben dar, ist eine Erfassung der Beanspruchung annähernd ununterbrochen möglich.

3.3.4 Situationsgetriggelter Rückschluss auf eine mögliche Operateurbeanspruchung

Bei diesem Ansatz handelt es sich um eine reine Abschätzung des Beanspruchungszustandes des Operateurs. Grundlegende Annahme ist hierbei, dass der Operateur infolge des Auftretens kritischer Ereignisse unter Umständen nicht mehr in der Lage ist, notwendige Aufgaben selbst, oder aber ausreichend effizient auszuführen [Parasuraman u. a., 1991]. Kritische Ereignisse im fliegerischen Kontext können dabei beispielsweise Systemausfälle, unvorhergesehene Verschlechterungen der Arbeits- oder Umweltbedingungen oder aber Auftragsänderungen darstellen.

Da sich die Situation und damit das Auftreten kritischer Ereignisse intrusionsfrei erfassen lassen, wird dieses Verfahren gerne im Rahmen adaptiver Systeme verwendet. Nach [Parasuraman u. a., 1992] gehören diese zu den so genannten Grundsystemen der adaptiven Automation. Da es jedoch in keinsten Weise den tatsächlichen Zustand des Operateurs, noch seine Äußerungen im Umgang mit dem System berücksichtigt, wird dieses Verfahren als situationsadaptiv bezeichnet.

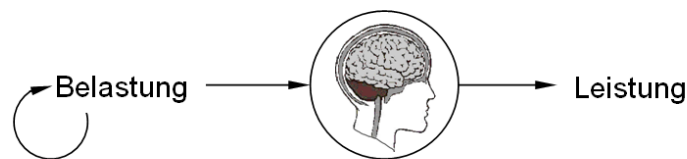


Abbildung 3.10: Pauschaler, situationsgetriggelter Rückschluss auf die Operateurbeanspruchung

Vorteile des Verfahrens:

Nach [Banburry u. a., 2008] stehen kritische Ereignisse oftmals in einer engen Verbindung mit den zu verfolgenden Missionszielen, wodurch ihre Implementierbarkeit im Rahmen technischer Systeme als Auslöser für Unterstützungsfunktionen erleichtert wird. Ähnliches betont [Parasuraman u. a., 1992]. So weist auch er auf die leichte Realisierbarkeit sowie die flexible Anpassbarkeit an mögliche Ereignisse im Missionsverlauf hin, die seiner Ansicht nach einen wesentlichen Vorteil des situationsgetriggerten Rückschlusses darstellen.

Neben der leichten Realisierbarkeit sieht [Inagaki, 2003] einen weiteren Vorteil darin, dass bei einer situationsgetriggerten Beanspruchungsabschätzung (Abbildung 3.10) keine komplexen Verhaltens- oder Verarbeitungsmodelle des Menschen benötigt werden. Für die Verwendung dieser Methode bedarf es lediglich einer automatischen Erkennung kritischer Ereignisse, was allerdings in der Praxis auch sehr anspruchsvoll sein kann.

Einschränkungen/Nachteile des Verfahrens:

Die wesentliche Einschränkung dieser Methodik liegt in der mangelnden Berücksichtigung der tatsächlichen Operateurbeanspruchung [Parasuraman u. a., 1992] [Inagaki, 2003]. So variiert die Beanspruchung für unterschiedliche Versuchspersonen infolge individueller Fertigkeiten, Fähigkeiten und Strategien im Umgang mit dem Auftreten kritischer Ereignisse, wodurch die tatsächliche, individuelle Beanspruchung für ein und dasselbe Ereignis deutlich unterschiedlich sein kann [Inagaki, 2003]. Eine situationsgetriggerte, pauschale Unterstützung, unabhängig vom tatsächlichen Bedarf,

kann folglich in einer unnötigen und unangebrachten Unterstützung resultieren, die wiederum eine Unterforderung des Operateurs zur Folge haben kann.

3.3.5 Analytische Beanspruchungsbestimmung durch Ressourcenmodelle

Diese Methode der analytischen Beanspruchungserfassung beruht auf einer Modellierung der Belastungssituation in Verbindung mit Annahmen über Eigenschaften der menschlichen Informationsverarbeitung. Bei diesem Verfahren erfolgt eine Abschätzung benötigter Ressourcen des menschlichen Operateurs auf Basis einer bekannten Belastungssituation (Abbildung 3.11). Die Belastungssituation wird hierbei im Wesentlichen abgeleitet aus dem Arbeitsauftrag und den damit verbundenen Aufgaben, sowie den zur Verfügung stehenden Interaktionsmedien. So wird für jede Aufgabe bzw. Aufgabenkombination, eine Abschätzung benötigter Ressourcen sowie deren Auslastungsgrad ermittelt. Zur Abschätzung benötigter Ressourcen wird hierfür oftmals auf das multiple Ressourcenmodell, basierend auf der „*Multiplen Ressourcentheorie*“ nach [Wickens, 1992], zurückgegriffen. Dieses erlaubt eine Trennung mentaler Prozesse in Wahrnehmung, Verarbeitung und Antwort, sowie Berücksichtigung verwendeter Modalitäten (auditiv/visuell) und des zugrundeliegenden Informationscodes (räumlich/verbal). Hierdurch wird eine detaillierte Betrachtung benötigter Ressourcen im Rahmen der Aufgabenbearbeitung möglich [Maiwald und Schulte, 2011].

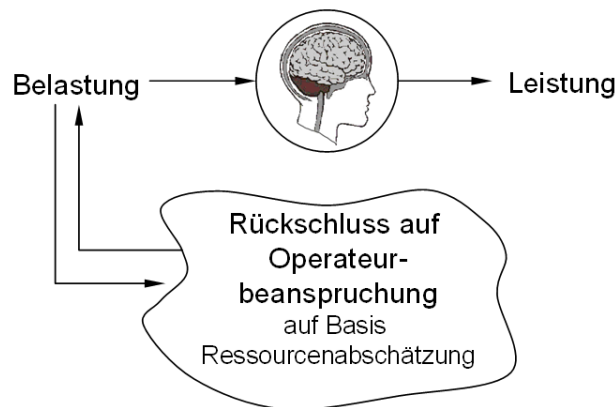


Abbildung 3.11: Ressourcenabschätzung zur Ermittlung möglicher kritischer Operateurbeanspruchung

Vorteile des Verfahrens:

Mit Hilfe dieses Wissens über benötigte Ressourcen zur Erfüllung bestimmter Aufgaben ist es möglich Ressourcenkonflikte (kritische Ressourcenauslastungen) nicht nur für den gegenwärtigen Zustand, sondern auch für zukünftige Zustände, zu identifizieren [Inagaki, 2003]. Diese proaktive Ermittlung möglicher Konflikte erlaubt es bereits im Vorfeld dagegen anzugehen, beispielsweise durch eine Aufgabenneu-/umverteilung, eine Adaption des Automationsgrades, oder eine ressourcenorientierte Informationsvermittlung [Miller u. a., 1999] [Maiwald und Benzler, 2010] [Maiwald und Schulte, 2011].

Einschränkungen/Nachteile des Verfahrens:

Essentielle Einschränkungen zeigen sich darin, dass es sich hierbei nicht um eine tatsächliche Erfassung des Beanspruchungszustandes sondern ebenfalls, wie auch schon beim situationsgetriggerten Rückschluss, um eine Beanspruchungsabschätzung handelt. Nachteilig ist nach [Kerkau, 2005] [Tsang und Wilson, 1997] zudem der erhebliche Erfassungsaufwand für die dabei benötigten Maße

im Modell, sowie die Abhängigkeit dieser Maße von den unterschiedlichen Modellvorstellungen menschlicher Informationsverarbeitung.

3.3.6 Physiologische Methoden

Physiologische Erfassungsmethoden beruhen auf der Erkenntnis der neurokognitiven Wissenschaften, dass mentale Vorgänge, so auch das Phänomen der Beanspruchung, immer auf die Aktivität von Körperfunktionen (insbesondere Hirnfunktionen, wenn wir mentale Beanspruchung betrachten wollen) zurück zu führen sind. Damit muss eine Änderung der Beanspruchung in einer Änderung der Aktivität der Körperfunktionen des Menschen resultieren. Je nach betrachteten Parametern können diese Aktivitätsänderungen entweder direkt von außen oder mit Hilfe von elektrophysiologischen Verfahren, oder durch chemische Verfahren bis hin zu nur klinisch anwendbaren bildgebenden Verfahren erfasst werden [Grandt, 2004] [Haarmann, 2007]. Ziel dieser Methodik ist es, durch die individuelle Reaktion physiologischer Parameter des Operateurs, einen Rückschluss auf dessen gegenwärtige Beanspruchungssituation zu erhalten (Abbildung 3.12). Oftmals verwendete Parameter im Rahmen einer physiologischen Zustandserfassung sind beispielsweise zerebrale Aktivität (z.B. EEG, Ereigniskorrelierte Potentiale), Elektrodermale Aktivität (Hautwiderstand), Hormonhaushalt (z.B. Adrenalin, Noradrenalin, Cortisol), Respiration (z.B. Atemfrequenz, -volumen, -sättigung), EMG (Muskel-Aktionspotentiale), okulomotorische Funktionen (z.B. Lidschluss, Blickbewegungen, Pupillendurchmesser) und Parameter des kardiovaskulären System (z.B. EKG, Herzratenvarianz). Für eine detailliertere Beschreibung typischer physiologischer Parameter, zugehöriger Messverfahren, sowie die Eignung dieser Parameter im Rahmen einer Operateurzustandserfassung, insbesondere in Hinblick auf Aussagefähigkeit bezüglich der Operateurbeanspruchung wird hier auf [HFM-056/TG-008, 2004] verwiesen.

Im Zusammenhang mit physiologischer Operateurzustandserfassung findet sich auch oftmals der Begriff *Augmented Cognition* wieder. *Augmented Cognition* beschreibt dabei ein Forschungsfeld, dass es sich zum Ziel gesetzt hat, den kognitiven Zustand eines Operateurs in Echtzeit mit Hilfe von modernen, überwiegend neurowissenschaftlich basierten Methoden und Hilfsmitteln zu erfassen, um sowohl die Technologie, Informationen, als auch die Umgebung möglichst optimal an die Bedürfnisse des Operateurs anzupassen [Schmorrow und Reeves, 2007].

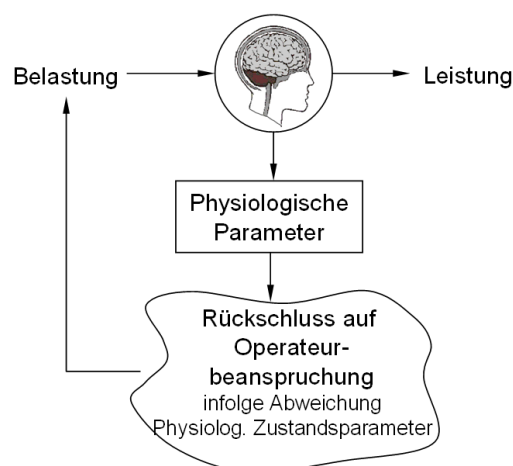


Abbildung 3.12: Ableiten der Operateurbeanspruchung auf Basis physiologischer Parameter

Vorteile des Verfahrens:

Ein zentraler Aspekt, der für die Verwendung von physiologischen Parametern zur Beanspruchungserfassung eines Operators spricht, liegt in der kontinuierlichen und je nach verwendeter Messtechnik nur wenig intrusiven Erfassbarkeit [Prinzel u. a., 2001] [Wilson, 1991] [Scerbo u. a., 2001] [Cain, 2007] [O'Donnel und Eggemeier, 1986]. Somit besitzt dieses Verfahren zumindest prinzipiell die Voraussetzung für eine Verwendung im Rahmen adaptiver Systeme, wie zum Beispiel bei Assistenzsystemen.

Ferner ermöglicht es die kontinuierliche Verfügbarkeit von Parameter, Schwächen der oftmals nur diskreten Beanspruchungserfassung entgegen zu wirken [Prinzel u. a., 2001] [Wilson, 1991] [Scerbo u. a., 2001] [Kramer und Humphrey, 1996]. [Inagaki, 2003] und [Parasuraman u. a., 1991] [Parasuraman u. a., 1992] betonen hierzu, dass es mit Hilfe der kontinuierlichen physiologischen Messwertfassung gelingt, auch versteckte kognitive Aktivitäten des Operators zu erfassen, die bei reinen Interaktionsmessungen im Rahmen der „*supervisory control*“ und der damit verbundenen oftmals sehr eingeschränkten Reaktionen des Operators verborgen bleiben würden. Ferner bieten, einige der verwendeten physiologischen Parameter zusätzlich diagnostische Informationen hinsichtlich der Ursache der Beanspruchung [Parasuraman u. a., 1992] [Donchin u. a., 1986]. Ein weiterer, nicht zu verachtender Vorteil dieses Ansatzes ist es nach [Haarmann, 2007], dass die Erfassung physiologischer Operateurdaten, im Gegensatz zu psychologischen Skalen oder Fragebögen, ohne eine mögliche Verfälschung durch den Probanden aufgezeichnet werden können und damit objektiv sind.

Einschränkungen/Nachteile des Verfahrens:

Trotz der vielen Vorteile physiologischer Erfassungsmethoden existieren auch eine Vielzahl nicht zu vernachlässigende Einschränkungen.

Eine wesentliche Problematik in der Anwendung physiologischer Verfahren liegt in der fehlenden Standardisierung dieser Verfahren. So benötigt jedes dieser Verfahren, individuell für jeden Operateur, im Vorfeld einer Datenerfassung in Form einer Baseline-Messung [Parasuraman u. a., 1992]. Diese sind notwendig, um neben dem individuellen Grundverlauf (ohne zusätzlich aufgebrachte Belastung), auch tageszeitabhängige Schwankungen zu ermitteln.

Eine weitere Problematik bei der Verwendung physiologischer Verfahren ergibt sich durch die interindividuelle Variation. So mag die Reaktion auf einen Stimulus bei einigen Operateuren beispielsweise eine Variation in der Herzfrequenz, bei anderen hingegen eine Variation des Blutdrucks herbeiführen.

Als nachteilig erweist sich auch der hohe technische Aufwand zur Erfassung, die oftmals kostenintensive Beschaffung entsprechender Messtechnik, sowie die oftmals stark verrauschten Daten, die einer aufwendigen, analytischen Nachbearbeitung zur Eliminierung der Störfaktoren bedürfen. [Wilson, 1991] merkt zudem an, dass bei gleichzeitiger Verwendung von mehreren physiologischen Verfahren zur Erfassung des Operateurzustandes auch auf mögliche Interferenzeffekte zu achten ist. Als Beispiel führt er hierzu die Beeinflussung von Lidschlüssen (verwendete Methode zur Erfassung z.B. EOG) und der EEG-Erfassung auf.

3.3.7 Verhaltensmodelle

Dieser Ansatz sieht eine Erkennung von hohen/kritischen Beanspruchungen bzw. Überforderungssituationen auf Basis des Operateurverhaltens vor. Es handelt sich hierbei um einen objektiven Ansatz, der ein *kontinuierliches, nicht intrusives* Erfassen des Operateurverhaltens anhand seiner Interaktionen im Umgang mit dem System erlaubt. Dies stellt eine Grundvoraussetzung für einen Einsatz in adaptiven Systemen dar.

Hinsichtlich der Verwendung von Verhaltensmodellen sind zweierlei Arten zu unterscheiden:

- Verhaltensmodelle, die das Operateurverhalten bezüglich normativer Vorgaben (z.B. bezüglich IFR-Flugregeln) kombiniert mit individuellen Abweichungen (vgl. Kapitel 2.3.3) [Stütz, 1999] abbilden. Diese Verhaltensmodelle erlauben es, Änderungen des Operateurverhaltens hinsichtlich unterlassener oder nicht korrekt durchgeführter Aktionen zu beobachten. Grundlegende Annahme hierbei ist, dass eine derartige Änderung des Operateurverhaltens, die nicht in Zusammenhang mit einer geänderten Absicht des Operators steht, ein Fehlverhalten darstellt und damit eine Beanspruchungssituation widerspiegelt, in der der Operateur einer Unterstützung bedarf.
- Verhaltensmodelle, die das Operateurverhalten hinsichtlich der individuellen, aufgabenspezifischen Durchführung der Operatöraufgaben widerspiegeln. Im Fokus der Betrachtung dieser Modelle steht dabei nicht mehr, ob oder wie gut eine Aufgabe durch den Operateur durchgeführt wird, sondern die Art und Weise der Aufgabendurchführung. Diese Art der Betrachtung erlaubt es, Abweichungen bzw. Anomalien in der Aufgabendurchführung zu erfassen, noch bevor tatsächliches Fehlverhalten auftritt. Grundlegende Annahme ist in diesem Fall, dass sich das Operateurverhalten, bezogen auf die Durchführung von Aufgaben, in hohen bzw. kritischen Beanspruchungssituationen, beobachtbar ändert. Eine detaillierte Darstellung dieses Ansatzes, der die Grundlage dieser Arbeit darstellt, findet sich in Kapitel 4.

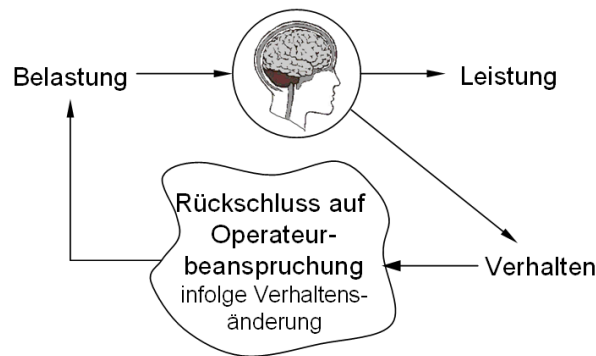


Abbildung 3.13: Rückschluss auf die Operateurbeanspruchung auf Basis von Operateurverhalten

Vorteile des Verfahrens:

Wesentliche Vorteile beider Ansätze liegen in der kontinuierlichen, intrusionsfreien Erfassung des Verhaltens durch Abgreifen der Interaktionen des Operators im Umgang mit dem System. Ferner unterliegt Verhalten, als objektives Maß, keiner Verfälschung durch den Operateur.

Werden hierbei Verhaltensmodelle verwendet, in den die Aufgabendurchführung im Vordergrund steht, ist hier als weiterer, essentieller Vorteil die Proaktivität hervorzuheben. So ist es unter Verwendung dieser Verhaltensmodelle möglich, Änderungen in der Aufgabendurchführung zu erkennen, noch bevor es zu einem tatsächlichen Fehlverhalten des Operators kommt (vgl. Kapitel 4). Zudem bietet dieser Ansatz, durch Miteinbeziehung visueller Operateurinteraktionen, die Möglichkeit Verhaltensänderungen auch in *supervisory-control*-Aufgaben zu identifizieren, die sich nur durch geringe manuelle Interaktionen auszeichnen. Im Unterschied zu den anderen, bereits dargestellten Verfahren zeichnet sich dieser Ansatz durch Diagnosefähigkeit aus. So steht hier die Bedeutung des Verhaltens, das einen Zusammenhang zu einer bestimmten Aufgaben- oder Reizkontext besitzt, im Vordergrund der Betrachtungen.

Einschränkungen/Nachteile des Verfahrens:

Verhaltensmodelle, die Verhalten im Sinne eines Leistungsmaßes (z.B. korrekter/durchgeführter Aktionen) verwenden, besitzen als wesentliche Einschränkung ihre Reaktivität. So greift dieser Ansatz folglich erst, wenn entsprechende Fehler bzw. Abweichung bereits erfolgt sind und agiert

somit eher im Sinne einer Fehler- und Abweichungskorrektur.

Verhaltensmodelle hingegen, deren Betrachtungsgrundlage die Aufgabendurchführung ist, zeichnen sich durch einen hohen Erfassungsaufwand im Vorfeld aus. So müssen prinzipiell für jede Aufgabensituation normales (reguläres), wie auch abweichendes Verhalten, individuell für jeden Operateur, resultierend aus individuellen Fähigkeiten bzw. Erfahrungen und damit Bearbeitungsstrategien, erfasst und modelliert werden.

Resümee:

Ausgehend von der Anforderung an Assistenzsysteme zu erkennen, wann sein menschliches Teammitglied überfordert ist, um ihm in diesen Situationen entsprechende Unterstützung zukommen zu lassen, beschäftigte sich dieses Kapitel mit den Herausforderungen und Schwierigkeiten bezüglich der Bestimmung der subjektiven Beanspruchung eines Operateurs. Es wurde verdeutlicht, dass der Begriff der Überforderung für einen nicht exakt definierten Bereich der Beanspruchung steht und bereits die zugrundeliegende Beanspruchung, infolge ihrer indifferenten Begriffsdefinitionen, ihrer Subjektivität und Multidimensionalität unerwünscht negative Konsequenzen hinsichtlich einer Messbarkeit und Parametrisierbarkeit des Konzepts mit sich bringt. Ferner wurden verschiedene Verfahren vorgestellt und diskutiert, sich diesem Konstrukt mit Hilfe überwiegend objektiver, messtechnisch erfassbarer Parameter zu nähern. Da es das Ziel zukünftiger Assistenzsysteme ist, möglichst *proaktiv*, d.h. vor dem Eintreten von Fehlern Unterstützung anzubieten, kommen für ein derartiges Vorhaben von den hier vorgestellten Methoden im Wesentlichen nur der situationsgetriggerte Rückschluss, der ressourcenbasierte Ansatz oder der verhaltensbasierte Ansatz in Frage. Hierbei sieht ausschließlich der letzte Ansatz eine tatsächliche Berücksichtigung des Operateurs vor, während die ersten beiden Verfahren lediglich auf einer Abschätzung eines möglichen Operateurzustandes basieren. Im Folgenden wird daher der verhaltensbasierte Ansatz weiter untersucht, mit dem Ziel eine Verbesserung zukünftiger Assistenzsysteme hinsichtlich *Proaktivität* und *Operateuradaptivität* zu erreichen.

Kapitel 4

Konzept

Ausgehend von der Betrachtung verschiedener Ansätze zur Beanspruchungserfassung (vgl. Kapitel 3) soll im Folgenden nun ein verhaltensbasierter Ansatz aufgegriffen und erläutert werden. So ändert sich das Verhalten von Operateuren in hohen Beanspruchungssituationen als Folge eines Selbstadaptionmechanismus an die aktuell vorherrschenden Belastungs- und Beanspruchungsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.2). Dabei spiegelt das Verhalten den tatsächlichen Operateurzustand wider, der sich kontinuierlich anhand von Verhaltensparametern erfassen lässt. Damit erscheint die Verwendung von Verhalten als Indikator für bevorstehende Überforderungssituationen eines Menschen besonders vielversprechend und soll im Folgenden detailliert betrachtet werden.

Hierzu wird in Abschnitt 4.1 die Eignung der Beobachtung von Operateurverhalten als Methode zur Beanspruchungserfassung im Vergleich zu den in Kapitel 3 dargestellten Ansätzen diskutiert. Abschnitt 4.2 konkretisiert und begründet den verhaltensbasierten Ansatz im Hinblick auf die zu fordernden Systemeigenschaften. Abschnitt 4.3 überführt die theoretischen Betrachtungen in einen experimentellen Ansatz und stellt dafür die notwendigen Schritte zur Operationalisierung dar.

4.1 Entscheidung für den verhaltensbasierten Ansatz

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die adaptiven Fähigkeiten zukünftiger Assistenzsysteme um die Fähigkeit zur maschinellen Erkennung von Überforderung des Bedieners zu erweitern. Dieses Ziel kann nicht in einem Schritt erreicht werden. Daher soll in dieser Arbeit zunächst ein Ansatz identifiziert und konkretisiert werden, der es einem Assistenzsystem ermöglicht, Überforderungen des Operators möglichst frühzeitig zu erkennen. Es werden folglich Indikatoren für die Erkennung von Überforderung gesucht, die diesen Zustand nicht erst aus der Reduzierung der Leistung des Operators ableiten. Vielmehr wird das Ziel angestrebt, bereits hohe bzw. kritische Operateur-Beanspruchungszustände im Vorfeld vor einem direkt beobachteten Leistungseinbruch zu erkennen. In diesem Zusammenhang ergeben sich bestimmte Anforderungen an das Verfahren zur Erfassung der Operateurbeanspruchung und damit auch an die hiermit realisierbare Assistenzfunktion. Im Folgenden sollen diese Anforderungen aufgestellt und systematisch untersucht werden.

- Das Eingreifen des Assistenzsystems soll **proaktiv** sein:
Um ein rechtzeitiges Eingreifen eines Assistenzsystems zu ermöglichen, muss das Verfahren zur Überforderungserkennung die Fähigkeit besitzen, einen kritischen Operateurbeanspruchungszustand, d.h. eine Überforderung **rechtzeitig vor** dem Eintreten von Fehlleistungen zu identifizieren. Nur so ist es möglich, nicht mehr ausschließlich nachträglich, d.h. im Sinne einer Fehlerkorrektur einzugreifen, sondern proaktiv Unterstützung anzubieten, um die

Wahrscheinlichkeit von schwerwiegenden Fehlleistungen zu reduzieren.

- Die Überwachung der Beanspruchung soll **kontinuierlich** erfolgen:
Im Gegensatz zu Erfassungsmethoden, die nur eine zeitdiskrete, retrospektive Beobachtung des Operateurzustands erlauben, wie beispielsweise Fragebogenmethoden, soll hier ein Verfahren verwendet werden, das eine **zeitlich möglichst durchgänge** Erfassung der Operateurbeanspruchung ermöglicht. Dies ist eine grundlegende Voraussetzung um Überforderungssituationen zeitnah und damit rechtzeitig erkennen zu können, ohne kritische Beobachtungslücken aufkommen zu lassen. Dazu müssen die vom Messverfahren verwendeten Parameter möglichst kontinuierlich erfassbar sein.
- Die Überwachung der Beanspruchung soll **operatorsensitiv** sein:
Das Verfahren soll sich an der Beobachtung der **tatsächlichen Handlungen** des Operators orientieren. Diese Forderung steht im Gegensatz zu verbreiteten Vorgehensweisen, die lediglich aufgrund äußerer Ereignisse auf Überforderung des Operators schließen, dabei aber nicht die individuellen Reaktionen auf solche Belastungen im Sinne der subjektiven Beanspruchung reflektieren. Dazu sollte der Operateur möglichst umfassend beobachtet werden. Ziel ist es durch Berücksichtigung des aktuellen Operateurzustandes, die Unterstützungsleistung eines Assistenzsystems an den tatsächlichen Zustand und Bedarf des Operators anzupassen.
- Die Beurteilung der Beanspruchung soll **kontextspezifisch** sein:
Die zur Bestimmung der Beanspruchung und damit verbunden der Erkennung von Überforderung verwendeten Parameter sollen **in direktem Zusammenhang mit der Aufgabe** stehen. Dies ermöglicht es, entsprechende Beobachtungen unmittelbar mit den jeweiligen Aufgaben bzw. mit dem Aufgabenkontext in Verbindung zu bringen. Aufbauend auf dieser diagnostischen Information kann erst dann auch eine *aufgabenspezifische Unterstützung* angeboten werden.
- Die Beobachtung des Operators soll **nicht-intrusiv** sein:
Das Verfahren zur Erfassung des Operateurbeanspruchungszustandes soll den Operateur **bei der Durchführung seiner Aufgabe nicht beeinflussen oder behindern**. Hiermit soll eine Verfälschung der durch das Verfahren erfassten operatorspezifischen Parameter als Folge einer Intrusion durch das Messverfahren vermieden werden.

Diese Anforderungen dienen nun als Grundlage, um die in Kapitel 3 vorgestellten Methoden zur Beanspruchungserfassung im Hinblick auf ihre grundsätzliche Eignung zu analysieren. Abbildung 4.1 zeigt hierzu die Übersicht der betrachteten Verfahren zur Operateurbeanspruchungserfassung, sowie eine Beurteilung in wie weit die einzelnen Anforderungen durch das jeweilige Verfahren erfüllt, bedingt erfüllt, oder gar nicht erfüllt werden können.

	Frage- bögen	Leistung in HA	Leistung in NA	Situation	Ressourcen- modelle	Physiologie	Verhalten
pro-aktiv	—	—	(✓)	✓	✓	✓	✓
kontinuierlich	—	✓	(✓)	—	(✓)	(✓)	(✓)
operatorsensitiv	✓	✓	✓	—	—	✓	✓
kontextspezifisch	(✓)	✓	—	✓	✓	—	✓
nicht-intrusiv	—	✓	—	✓	✓	—	✓

Abbildung 4.1: Erfüllungsgrad der verschiedenen Methoden zur Erfassung des Operateurbeanspruchungszustandes hinsichtlich der Anforderungen

Fragebögen

Unter der Annahme, dass Versuchspersonen ihre Beanspruchung überhaupt wiedergeben können, spiegelt das Verfahren den retrospektiv empfundenen Zustand des Operators wider. Abhängig vom Zeitpunkt der durchgeführten Befragung können unter Umständen hohe Beanspruchungssituationen a-posteriori erkannt werden. Da zu dem Zeitpunkt der Befragung eine bestimmte Aufgabensituation referenziert wird, kann in diesem Fall ein Rückschluss auf den zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Aufgaben-/Situationskontext erfolgen.

Leistung in Hauptaufgaben

Die Leistung in Hauptaufgaben bezieht sich für gewöhnlich auf Reaktionen des Operators bzw. des Systems, die aus der Bearbeitung von Aufgaben resultieren. Damit ist die Methode per se operatorsensitiv. Durch den Zusammenhang mit der vom Operator bearbeiteten Aufgabe ermöglicht das Verfahren zudem einen Rückschluss auf den zugrunde liegenden Kontext. Sowohl die Reaktionen des Operators, als auch die Systemzustände lassen sich ohne eine Beeinträchtigung des Operators erfassen, wodurch die Methode als nicht-intrusiv einzuordnen ist. Als Leistungsparameter werden dabei nicht selten Abweichungen von im Vorfeld definierten Grenzwerten, oder die korrekte Durchführung von Aufgaben betrachtet. Diese Leistungsparameter lassen sich jedoch erst reaktiv, d.h. nach Überschreiten entsprechend festgelegter Grenzwerte, oder bei Auftreten eines Fehlers in der Aufgabenbearbeitung feststellen. Werden diese Parameter als Grundlage für die Erkennung kritischer Operatorbeanspruchung herangezogen, wird auch dieser Zustand entsprechend reaktiv erkannt.

Leistung in Nebenaufgaben

Hier wird die Bearbeitungsqualität in der Nebenaufgabe verwendet, um eine Aussage über den Zustand des Operators zu treffen. Damit handelt es sich hierbei überwiegend um Leistungsmaße bezogen auf die Nebenaufgabe. Um diese zu erhalten, muss eine Nebenaufgabe an sich erst mal durchgeführt bzw. abgeschlossen werden. Abhängig von der Art der Nebenaufgabe (kontinuierlich vs. diskret) kann demzufolge auch der Operatorzustand kontinuierlich bzw. diskret erfasst werden. Allerdings besteht durch die Beobachtung der Leistung in den Nebenaufgaben die Möglichkeit kritische Situationen für die Primäraufgabe frühzeitig zu erkennen, vorausgesetzt die Nebenaufgabe wird nicht zur Primäraufgabe des Operators. Somit kann das Verfahren als bedingt proaktiv angesehen werden.

Aufgabensituationen

Die Verwendung von Aufgabensituationen für einen Rückschluss auf den Beanspruchungszustand sehen eine a-priori Festlegung von (Aufgaben-)Situationen vor, die möglicherweise zu einer hohen Beanspruchung des Operators führen können. Durch Erkennen dieser Situationen ist es dabei unter Umständen möglich, auch kritische Beanspruchungssituationen proaktiv identifizieren zu können. Da für diesen Rückschluss jedoch nur die (Aufgaben-)Situation in Betracht gezogen wird, nicht jedoch die tatsächliche Reaktion des Operators in dieser Situation, kann hierbei nicht von Operatorsensitivität gesprochen werden. Da das Verfahren an sich bereits eine Betrachtung der Aufgabensituation vorsieht, spiegelt es damit automatisch den Kontext wider. Darüber hinaus lassen sich die (Aufgaben-)Situationen im Allgemeinen ohne eine Beeinflussung des Operators abgreifen, wodurch das Verfahren als nicht-intrusiv angesehen werden kann.

Ressourcenmodelle

Ressourcenmodelle ermitteln kritische Beanspruchungen über benötigte Ressourcen und mögliche Ressourcenkonflikte für die Bearbeitung bestimmter Aufgabensituationen. Die dabei zugrundeliegenden Aufgabensituationen lassen sich je nach Granularität der Modelle kontinuierlich erfassen. Dies gilt folglich auch für die daraus abgeleiteten benötigten Ressourcen und Konflikte. Da entsprechende Modelle auch künftige Aufgaben vorhersagen können, kann eine entsprechende vorausschau-

ende Ermittlung möglicher Ressourcenkonflikte und damit kritischer Beanspruchungssituationen erfolgen. Durch die Bindung der Ressourcen an die Aufgaben wird das Verfahren kontextspezifisch. Da die Ressourcen ausschließlich von der Aufgabensituation abgeleitet werden findet keine Beeinflussung oder Störung des Operators statt.

Physiologie

Physiologische Parameter reflektieren die unmittelbare Reaktion einzelner Körperfunktionen bezogen auf den vorherrschenden Belastungs- und Beanspruchungszustand. Damit ist das Verfahren operatorsensitiv. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass physiologische Verfahren eine proaktive Erkennung kritischer Operatorzustände ermöglichen. Hintergrund für diese Annahme sind die von Operateuren in hohen Beanspruchungssituationen angewendeten Mitigationsstrategien, die wiederum eine Auswirkung auf entsprechende physiologische Parameter besitzen. Abhängig von den betrachteten physiologischen Parametern zur Operatorzustandserfassung, sowie der verwendeten Messmethode (bildgebende, chemische, optische, elektrische Verfahren), lassen sich einige dieser Parameter kontinuierlich (z.B. EEG, Hautwiderstand) andere wiederum nur diskret (z.B. Adrenalinausschüttung) erfassen. Die meisten der dabei angewendeten Verfahren führen dabei zu einer deutlichen Beeinträchtigung des Operators, wodurch die Methode als entsprechend intrusiv angesehen wird. Auch ist es bis dato noch nicht möglich, eine Korrelation mit einem zugehörigen Aufgaben- bzw. Situationskontext herzustellen. Dies ist gegenwärtig noch Gegenstand aktueller Forschungen im Bereich physiologischer Methoden.

Verhalten

Das Verhalten spiegelt den Umgang der Operateure mit den Aufgaben wider. Damit ist es sowohl kontextsensitiv als auch operatorsensitiv. Da sich das Verhalten von Menschen bereits in hohen Beanspruchungssituationen als Folge einer Adaptionsreaktion ändert (Kapitel 4.2), bietet dieses Verfahren die Möglichkeit kritische Beanspruchungsreaktionen im Vorfeld zu identifizieren. Lediglich im Bereich der kontinuierlichen Erfassung bestehen gewisse Einschränkungen. Diese beziehen sich auf das Verhalten bei der Durchführung bestimmter Aufgabentypen. Handelt es sich hierbei beispielsweise um „*manual-control*“ Aufgaben, die ein kontinuierliches agieren des Operators erfordern, wie zum Beispiel das manuelle Steuern eines Flugzeugs, so lässt sich das Verhalten kontinuierlich z.B. anhand der Steuereingaben, erfassen. Wird hingegen das Verhalten bei „*supervisory control*“ Aufgaben betrachtet, die durch nur gelegentliche manuelle Interaktionen charakterisiert sind, kann die Erfassung manuellen Verhaltens lediglich zeitdiskrete Aussagen liefern. Da sich das Verhalten von Operateuren in den Interaktionen mit dem System manifestiert, lässt es sich rückwirkungsfrei im Hinblick auf die zu bearbeitende Aufgabe erfassen.

4.2 Detailbetrachtungen zum verhaltensbasierten Ansatz

Die Leistung, wie auch das Verhalten spiegeln Reaktionen des Operators auf die aktuelle Belastungssituation wider. Entsprechend der oben durchgeführten Betrachtungen scheinen sowohl Leistung als auch Verhalten eine gute Abdeckung hinsichtlich der definierten Kriterien zu erreichen. Doch unterscheiden sich Leistung und Verhalten in Bezug auf ihre proaktiven Eigenschaften. Im Folgenden sollen daher zunächst die Begriffe Leistung und Verhalten unter Verwendung des Arbeitssystems deutlicher voneinander abgegrenzt und die Hintergründe erläutert werden, die dafür sprechen, dass mit einem verhaltensbasierten Ansatz frühzeitig die Überforderung von Operateuren erkannt werden kann.

Abbildung 4.2 (links) zeigt das Arbeitssystem. Darin ist die **Leistung** ganz allgemein das Verhältnis aus dem erzielten Arbeitsergebnis (*WR*) bezogen auf das vorgegebene Arbeitsziel (*WO*). Beim Begriff der Leistung steht im Fokus, **wie gut** das gegebene Arbeitsziel bzw. Teilaspekte davon erreicht werden können. Typischerweise werden hierfür Parameterabweichungen (z.B. Genauigkei-

ten bei Einhalten von Vorgaben), sowie Fehler in der Aufgabendurchführung betrachtet. Dabei wird häufig die Leistung des Menschen (*OF*) einschließlich der dadurch ausgelösten Reaktionen der Maschine (*OSM*) betrachtet.

Das **Verhalten** hingegen bezeichnet das Verhältnis der vom Operateur gezeitigten Reaktionen in Form von Interaktionen (z.B. manuell, visuell, verbal) mit den OSMs bezogen auf den gegenwärtigen Belastungszustand. Dieser im Arbeitssystem auf den Operateur wirkende Belastungszustand stellt eine Kombination aus Arbeitsziel (*WO*), Umgebung (*ENV*) sowie der beobachtbaren Zustände und Ausgaben der OSMs dar (vgl. Abbildung 4.2, rechts). Damit wird die ausgeprägte Kontextabhängigkeit des Verhaltens klar. Im Unterschied zur Leistung findet bei der Betrachtung des Verhaltens das endgültige Resultat bzw. die Auswirkung der Bedienung der OSMs keine Berücksichtigung. Im Fokus der Betrachtung steht im Gegensatz zur Leistung nicht mehr **wie gut** eine Aufgabe durch den Operateur durchgeführt wurde, sondern **wie** die Aufgabe durchgeführt wird, d.h. die Art und Weise der Aufgabenbearbeitung.

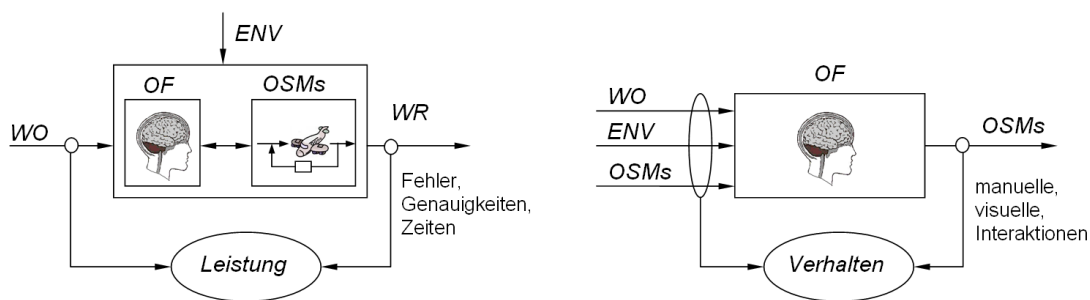


Abbildung 4.2: Leistung (links) und Verhalten (rechts) am Beispiel des Arbeitssystems

Abbildung 4.2 (rechts) zeigt, dem behavioristischen Ansatz folgend, das Verhalten des Operators als Reaktion auf eine bestimmte Reizkonstellation (Arbeitsziel, *WO*, Umgebung, *ENV*, technische Hilfsmittel, *OSM*). Dabei wird der Operateur zunächst nur als Black Box interpretiert, wobei seine kognitiven Vorgänge zunächst formal vernachlässigt werden [Dompke, 2001].

Als Kernaussage der kognitiven Psychologie [Solso, 2005] ist jedoch festzuhalten, dass der innere Zustand des Operators einen gravierenden Einfluss auf das Verhalten besitzt. Dieser Einfluss ergibt sich aus seinen individuellen Fähigkeiten, Erfahrung und Strategien, kurz den kognitiven Faktoren, die zu einer individuellen Variation des Verhaltens führen. Zu diesen kognitiven Faktoren ist aber eben auch der schwierig zu fassende Gesichtspunkt, der vom Operateur empfundene **Beanspruchung** zu rechnen.

Im Folgenden soll insbesondere der Aspekt der subjektiven Beanspruchung und dessen Auswirkung auf das Verhalten aufgegriffen und näher beleuchtet werden. Ferner soll untersucht werden, wie sich dieser Aspekt im Hinblick auf die geforderten proaktiven Fähigkeiten eines verhaltensbasierten Ansatzes nutzen lässt.

So zeigen Operateure in Situationen hoher subjektiver Beanspruchung beobachtbare Veränderungen des Verhaltens. Diese Verhaltensänderungen stehen mit Prozessen der Adaption bzw. Selbstregulation des Operators an die aktuell vorherrschende Belastungssituation im Zusammenhang. Diese Selbstregulationsprozesse von Operateuren werden mehrfach in der Literatur mit dem Begriff der „**selbstadaptiven Strategien**“ bezeichnet [Canham, 2001] [Veltman und Jansen, 2006] [Parasuraman und Hancock, 2000].

Nach [Canham, 2001] sind selbstadaptive Strategien:

„[an] attempt by the operator to cope with high workload demands by shedding and deferring tasks of lesser importance and urgency in favour of tasks that command immediate priority and attention. In doing so experienced operators attempt to balance her or his demands over time.“

Die von den Operateuren in hohen Belastungs-/Beanspruchungssituationen angewendeten Strategien können im Wesentlichen in zwei Kategorien unterteilt werden [Canham, 2001]:

- *load shedding*: Hierbei handelt es sich um Strategien, die eine Änderung der Art der Aufgabendurchführung (also des Verhaltens im Sinne der obigen Definition) zur Folge haben. Sie äußern sich beispielsweise in einem Hinauszögern bzw. Aufschieben von Aufgaben, dem Abweichen von Prozeduren, einer Aufgabenpriorisierung sowie einer geänderten Aufmerksamkeitsverteilung [Parasuraman und Hancock, 2000] [O'Donnel und Eggemeier, 1986].
- *load sharing*: Diese Strategien hingegen beziehen sich auf eine Abgabe der (Teil-) Aufgabenverantwortlichkeit. Dabei können (Teil-) Aufgaben entweder der Automation oder anderen Teammitgliedern übertragen werden.

Die Vielfalt an möglichen Strategien ergibt sich einerseits aus den Variationsmöglichkeiten, die eine Aufgabe in Bezug auf ihre Durchführung grundsätzlich ermöglicht, aber auch aus dem Vorhandensein zusätzlicher Ressourcen in Form von Automation bzw. menschlichen Teammitgliedern, die insbesondere ein *load-sharing* erst ermöglichen. Die Granularität von möglichen selbstadaptiven Strategien hängt damit stark von den Randbedingungen im betrachteten Arbeitssystem ab. Selbstadaptive Strategien sind damit äußerst kontextspezifisch. Ihre Verwendung als Indikator macht das Verfahren damit ausgesprochen kontextsensitiv.

Im Folgenden sollen hierfür einige Beispiele dargestellt werden, die insbesondere die Varianz an Erscheinungsformen selbstadaptiver Strategien veranschaulichen sollen.

So berichten [Parasuraman und Hancock, 2000] von selbstadaptiven Strategien, die sich beispielsweise in einer geänderten Reihenfolge der zu bearbeitenden Aufgaben, einer Abweichung der Ausführung von ursprünglichen Standardprozeduren, das Benutzen von Hilfskonstruktionen, oder provisorischen Lösungen, gewonnen aus früheren Erfahrungen, äußern. Selbstadaptive Strategien können nach [Parasuraman und Rovira, 2005] aber auch in einer weniger offensichtlichen Form auftreten, so beispielsweise in einer stärker fokussierten Informationsaufnahme oder einer geringeren Verarbeitungstiefe in der Aufgabendurchführung.

[Sperandio, 1978] berichtet von einer weiteren Erscheinungsform, die sich in der Anwendung weniger aufwendiger Verfahren äußert. So konnte [Sperandio, 1978] bei Fluglotsen in hohen Beanspruchungssituationen einen Strategiewechsel von einer ursprünglich individuellen Streckenführung für jedes einzelne Flugzeug hin zu einer starren Streckenführungsprozedur für alle dem Operateur zugewiesenen Flugzeuge entdecken. [Hockey, 1997] sieht in diesem Strategiewechsel einen Wechsel hin zu einem weniger ressourcenintensiven „Operationsmode“. Der Begriff „Operationsmode“ bezieht sich hierbei auf die von [Rasmussen, 1983] gewählte Taxonomie menschlichen Verhaltens in *wissenbasiertes*-, *regelbasiertes*- und *fertigkeitsbasiertes* Verhalten. Der Wechsel des Operationsmodos beschreibt nach [Hockey, 1997] damit einen Wechsel von der wissensbasierten Ebene hin zur regel-/oder gar fertigkeitsbasierten Ebene in hohen Beanspruchungssituationen.

Nach [Parasuraman und Rovira, 2005] kann die Anwendung selbstadaptiver Strategien auch dazu führen, dass Aufgaben bzw. Teilaspekte von Aufgaben, die aktuell weniger relevant sind, mit geringerer Genauigkeit oder weniger Zeitaufwand [Sperandio, 1971] bearbeitet werden. Ferner zeigt sich in diesen Situationen auch, dass ursprünglich parallel ausgeführte Aufgaben durch Adaption an die vorherrschende Situation vermehrt sequentiell ausgeführt werden.

Nach [Veltman und Jansen, 2006] kann sich ein selbstadaptives Verhalten des Operators auch darin äußern, dass der Operator mehr mentale Anstrengung investiert, wenn die ihm gestellte Aufgabe im Schwierigkeitsgrad ansteigt. Unter Umständen lässt sich jedoch auch ein herunterpriorisieren von individuellen Arbeitszielen beobachten, welches das Akzeptieren einer schlechteren Aufgabenerfüllung zur Folge hat [Funk, 1991].

Führt eine Änderung in der Aufgabenbearbeitung nicht zum gewünschten Erfolg, findet in der Regel eine Abgabe von Verantwortlichkeiten an andere Teammitglieder oder die Automation statt, sofern diese Ressourcen zur Verfügung stehen.

Die Anwendung solcher Strategien führt dazu, dass Operateure Aufgaben ökonomischer bzw. rationaler, nicht jedoch notwendigerweise im Sinne optimaler Leistung durchführen. So werden nicht selten primäre Ziele auf Kosten sekundärer Zielvorstellungen verwirklicht.

Ziel der Anwendung dieser Strategien ist es jedoch stets, durch bewusst aber auch unbewusst herbeigeführte Selbstregulation des Verhaltens, die subjektiv empfundene Beanspruchung auf einem akzeptablen Niveau zu halten und so drohende subjektive Überforderung (Überbeanspruchung) zu vermeiden. Dies führt dazu, dass diese Strategien, sowie die damit verbundenen Verhaltensänderungen bereits vor dem Eintreten einer Überforderungssituation und damit in Situationen hoher subjektiver Beanspruchung des Operators zur Anwendung gebracht werden (vgl. Abbildung 4.3).

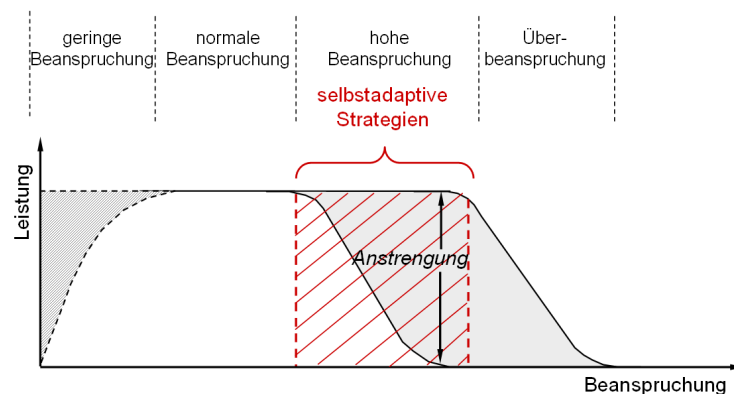


Abbildung 4.3: Änderungen des Operateurverhaltens in hohen Beanspruchungssituationen als Folge selbstadaptiver Strategien

Durch Anwenden dieser Strategien versuchen Operateure, das Erreichen eigener Kapazitätsgrenzen so lange wie möglich hinauszuzögern [Sperandio, 1978] (vgl. Abbildung 4.4), um so die Gesamtperformanz, insbesondere jedoch die Leistung in der Primäraufgabe trotz steigender Belastung möglichst lange aufrecht zu erhalten [Parasuraman und Rovira, 2005] [Hockey, 1997] [Metthews, 2001].

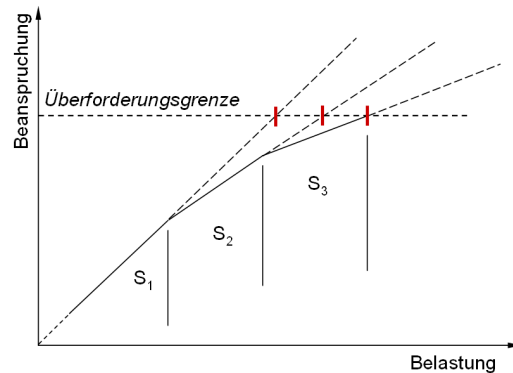


Abbildung 4.4: Anwendung verschiedener selbstadaptiver Strategien (S1, S2, S3) um das Erreichen einer Überforderung möglichst lange hinauszuzögern [Sperandio, 1978]

Es soll also der Frage nachgegangen werden, ob und in wie weit dieses Phänomen als Indikator zur maschinellen Erkennung von bevorstehenden Überforderungssituationen des menschlichen Operateurs herangezogen werden kann.

Durch die Beobachtung menschlicher Zusammenarbeit im Team können hier gewisse Parallelen gezogen werden. Menschliche Teammitglieder (z.B. Fahrlehrer, Fluglehrer, Beifahrer) nutzen häufig unterbewusst entsprechende Mechanismen, um ihren Partner einzuschätzen. Hierfür lernt der Mensch als Domänenexperte aufbauend auf der Beobachtung seines Teammitgliedes (z.B. Schüler) vorab Modelle über dessen typische, individuelle Verhaltensweisen bei der Interaktion im Arbeitssystem. Dies ermöglicht es ihm anschließend anhand von erkannten Verhaltensänderungen intuitiv auf eine Überforderungssituation des Teammitgliedes schließen zu können.

[Hoc, 2001] beschreibt dieses antizipatorische Vorgehen zwischen Teammitgliedern auf der Basis der Verhaltensbeobachtung für Piloten und Navigatoren.

„For example, in one of our studies on cooperation between a pilot (P) and a navigator (N) in a fighter aircraft, N can infer from the effects of th P's behaviour that P is overloaded and decides to perform a task initially allocated to P.“ [Loiselet und Hoc, 1999]

Ziel ist es, diese Fähigkeit des Menschen zur **Beobachtung** des Teammitglieds, zum strukturierten Abspeichern (**Lernen**) typischer Verhaltensmuster in Aufgabensituationen und zur **Erkennung** von Verhaltensänderungen die auf Überforderung des Teammitglieds hinweisen, künftig in maschinellen Assistenzsystemen zur Anwendung bringen zu können.

Im Vordergrund der weiteren konzeptionellen Betrachtungen stehen daher die Definition der notwendigen Schritte zur technischen Realisierung einer entsprechenden Funktion. Der Ausgangspunkt ist die Beobachtung des Operateurverhaltens in relevanten Aufgabensituationen. Diese sind gegeben durch die auf den Menschen einwirkende Reizsituation (im Arbeitssystem: WO, ENV, OSMs). Hierfür muss die Reaktion des Menschen in Hinblick auf ihre Beobachtung in ihre Teilaspekte zerlegt werden [Wormser, 1974]. Dazu wird im Folgenden das Verhalten zunächst in die von [Schulte, 1996] gewählten Kategorien der Umweltbeeinflussung und der Wahrnehmungskontrolle unterteilt (vgl. Abbildung 4.5). Der Begriff der Umweltbeeinflussung bezeichnet dabei die *Aktionen* des Operateurs, die eine zielgerichtete Beeinflussung der Umwelt bewirken. Diese können unter Verwendung des „*Multiplen Ressourcen Theorie*“ nach [Wickens, 1992] weiter in einen verbalen und einen manuellen Anteil unterteilt werden. Demgegenüber steht die Wahrnehmungskontrolle. Sie dient der

selektiven Aufmerksamkeitssteuerung des Operators, um relevante Informationen aufzunehmen und ist anhand von Blickbewegungen beobachtbar [Schulte, 1996].

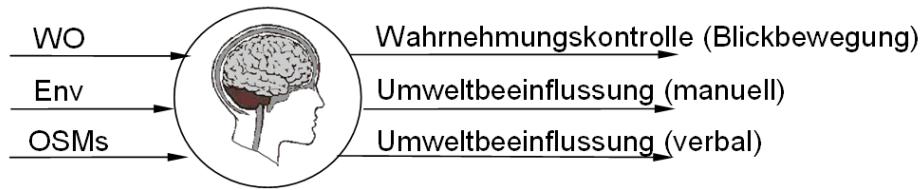


Abbildung 4.5: Komponenten des Operateurverhaltens (in Ahnlehnung an [Schulte, 1996])

Diese Differenzierung stellt die Grundlage für eine messtechnische Erfassung von Operateurverhalten durch den Einsatz entsprechender Messmethoden dar (z.B. Blickbewegungsmessung, Interaktionsmessung, Audioaufzeichnung).

Gleichzeitig ermöglicht diese Betrachtung des Operateurverhaltens, die Auswirkungen hoher bzw. kritischer Beanspruchung auf die einzelnen Komponenten des Verhaltens detaillierter zu betrachten. Die bislang angeführten Beispiele selbstadaptiver Strategien wurden nur im globalen Aufgaben-/Situationskontext, nicht jedoch hinsichtlich ihrer spezifischen Ausprägung und individuellen Beobachtbarkeit betrachtet. Dies soll nun im Folgenden detaillierter ausgeführt werden.

Hierfür werden zunächst verschiedene, in der Vergangenheit durchgeführte Studien in der Domäne der Luftfahrt angeführt, die sich bereits isoliert mit Auswirkung hoher Beanspruchung auf die einzelnen Verhaltensbestandteile beschäftigt haben.

Zusammenhang zwischen Beanspruchung, Überforderung und Blickverhalten

Einen Zusammenhang zwischen Beanspruchung und einer Änderung des Blickverhaltens von Operateuren dokumentieren verschiedene Simulatorstudien mit Piloten und Fluglotsen. Sie zeigen eine beanspruchungsbedingte Änderung des Operateurblickverhaltens, die sich in folgenden Merkmalen manifestiert:

- Reduzierung der „Entropie“ (Zufälligkeit) von Scanmustern [Ephrath u. a., 1980] [Harris u. a., 1986] [Tole u. a., 1983] [Hilburn u. a., 1997]
- Anstieg der Verweilzeiten (auf Primärinstrumenten) [Dick, 1980] [Harris u. a., 1982]
- Verringerung der Verweilzeiten auf Sekundärinstrumenten [Harris u. a., 1982]
- Reduzierung der Häufigkeit bestimmter Scanmuster [Harris u. a., 1982]
- gesteigerte Tendenz zur Zufälligkeit von Fixationsverteilungen [Nocera u. a., 2007] [Harris u. a., 1982]

Zusammenhang zwischen Beanspruchung, Überforderung und verbalen Verhalten

Die Auswirkung von Beanspruchung auf das verbale Verhalten von Operateuren wurde in verschiedenen Studien zur Cockpitkommunikation analysiert und nachgewiesen [Katz u. a., 1998] [Silberstein und Dietrich, 2003] [Parasuraman und Rovira, 2005]. Diese Studien belegen eine quantitative, wie auch qualitative Änderung der Kommunikation, die sich beispielsweise äußert in:

- einer Reduktion des Informationsflusses [Parasuraman und Rovira, 2005] [Katz u. a., 1998] [Silberstein und Dietrich, 2003],
- einer Änderung in der Informationsanforderung [Silberstein und Dietrich, 2003],
- einer Änderung in der Informationsvermittlung [Katz u. a., 1998],
- einem Absinken der Aufnahmebereitschaft von Information [Silberstein und Dietrich, 2003],
- sowie einem Absinken der Informationsqualität (Anstieg in emotionalen Äußerungen) [Silberstein und Dietrich, 2003] [Parasuraman und Rovira, 2005].

Ähnliche Aussagen, die einen Einfluss von hoher Beanspruchung auf die Kommunikation widerspiegeln, finden sich auch in selbst durchgeführten, strukturierten Interviews von Hubschrauberpiloten. Hiernach stellt die Veränderung der Kommunikation im Cockpit einen wesentlichen Indikator für eine hohe Beanspruchung ihres Teammitgliedes dar, die wie folgt von einem Fluglehrer umschrieben wird: *„Es wird ruhiger im Cockpit, die Kommunikation bricht zusammen, es gibt keine Reaktion mehr bei Ansprache des Crewmitgliedes, allgemeine Wortkargheit im Cockpit, Änderung der Stimmlage, eine laute, normalerweise mitteilende Person, wird ruhiger...“* (vgl. Anhang A).

Zusammenhang zwischen Beanspruchung bzw. Überforderung und manuellen Verhalten

Deutlich seltener hingegen sind Untersuchungen, die einen Zusammenhang zwischen Beanspruchung und manuellen Verhalten dokumentieren. Hier finden sich überwiegend Studien, die die Auswirkungen manuellen Verhaltens auf Beanspruchung, oder aber den Einfluss von Automation auf das manuelle Verhalten darlegen, nicht jedoch Studien, die die Änderung manuellen Verhaltens als Folge (hoher) Operateurbeanspruchung untersuchen. Eine Arbeit die die Änderung von (manuellen) Verhaltensmustern zur Erkennung von abnormalen Operateurverhalten in *supervisory control* Aufgaben nutzt, ist [Boussemart, 2011]. Der Zusammenhang mit dem Begriff der Beanspruchung wird in dieser Arbeit jedoch nicht explizit dargestellt, spielt jedoch unterschwellig eine Rolle als Auslöser für die beobachteten Verhaltensänderungen.

Trotz der mangelnden Studien scheint ein Zusammenhang zwischen Beanspruchung und manuellem Verhalten evident. So wurde in den oben aufgeführten Beispielen als Folge selbstadaptiver Strategien das Abweichen von (Standard-)Prozeduren beschrieben. Beziehen sich Prozeduren auf die Vorgehensweise der Bearbeitung von Aufgaben und den damit verbundenen, vom Operateur durchzuführenden (manuellen) Interaktionen, kann sich eine Änderung der Prozedur beispielsweise in einer Änderung der zugrunde liegenden Aktionssequenz, dem Weglassen einzelner Interaktionen, oder dem Auftreten neuer Interaktionen widerspiegeln.

4.3 Experimental Design zur Modelldatengewinnung

Im vorigen Abschnitt wurde der verhaltensbasierte Ansatz zur Überforderungserkennung motiviert. Dabei wurde die prinzipielle Vorgehensweise mit den Schlagworten **Beobachten** von Verhalten, **Lernen** von Mustern bzw. Modellen und **Erkennen** von Abweichungen charakterisiert. Diese zunächst dem Menschen eigene Vorgehensweise soll hier auf ein maschinelles System übertragen werden. Dazu soll hier in einem ersten Schritt ein Experiment definiert werden, welches es erlaubt, Verhalten von Operateuren (operateursensitiv) in spezifischen Aufgabensituationen (kontextspezifisch) **messtechnisch** zu **beobachten** und auf diese Weise Parameter für die Modellbildung zu gewinnen. In einem zweiten Schritt sollen dann diese Parameter verwendet werden, um mit Hilfe **maschineller Lernverfahren** entsprechende Modelle zu trainieren. Dieser Schritt, einschließlich der Auswahl eines an die empirischen Beobachtungen angepassten Lernverfahrens soll allerdings erst in Kapitel 7 vollzogen werden. Daher geht es hier zunächst um die Definition eines Beobachtungsexperiments.

Um operatorsensitive Beobachtungen machen zu können, sollen Domänenexperten, d.h. ausgebildete Luftfahrzeugführer für militärische Hubschrauber mit einem möglichst einschlägigen Erfahrungshintergrund, als Versuchspersonen herangezogen werden. Idealerweise sollten diese über Schwarmführerfähigkeiten verfügen. Als Schwarmführer besitzen sie Kenntnisse über den taktischen Einsatz und die Koordination der beteiligten Schwarmmitglieder bei situativen Lageänderungen. Dieses Wissen wäre ansatzweise in der hier betrachteten Multi-UAV-Führung übertragbar.

Um kontextspezifische Modelldaten gewinnen zu können, müssen diese Operateure in domänenspezifische, aber auch reproduzierbare Aufgabensituationen versetzt werden, also in dem hier vorliegenden Anwendungsfall in Aufgabensituationen aus dem Umfeld militärischer Hubschraubermissionen unter Einsatz von UAVs. Dies gelingt am besten, und nach dem derzeitigen Stand der Technik ausschließlich, in der virtuellen Simulation. Ferner soll das Verhalten über ein gewisses Spektrum hinsichtlich des Beanspruchungsniveaus beobachtet werden, um entsprechende selbstadaptive Strategien im Verhalten überhaupt erst zu provozieren. Dies soll durch eine gezielte Skalierung der Belastung erreicht werden. Diese Aspekte sollen nun im Einzelnen untersucht werden.

Der Kontext, in dem das Verhalten betrachtet werden soll, stellt eine luftgestützte, militärische Einsatzmission dar, in der mehrere UAVs als abgesetzte Sensorplattformen durch den Kommandanten des bemannten Hubschraubers zu führen sind.

Damit ist ein Aufgabenkontext gegeben, der bis dato als reale Applikation so noch nicht existiert. Dieser schließt eine Beobachtung des Operateurverhaltens in realen Umgebungen (z.B. Feldstudien) aus. Da es bisher keine ausgebildeten Operateure für spezifisch diese Aufgabenstellung gibt, kann auch von gängigen Wissensakquisitionsmethoden wie z.B. Interviews und Fragebögen wenig erwartet werden, um aufgabenspezifisches, normatives Verhalten, welches im Wesentlichen die notwendigen Aktionen des Operateurs zur Aufgabendurchführung umfasst, zu ermitteln.

Als weiterer Aspekt ist zu berücksichtigen, dass bestimmte Verhaltensaspekte, insbesondere die, die sich auf motorische Fähigkeiten beziehen und damit Teil des prozeduralen Gedächtnissystems darstellen, nur eingeschränkt verbalisierbar sind [Pritzelt u. a., 2009].

Angesichts dieser Ausgangslage soll für die Beobachtung von Operateurverhalten auf kontrollierte Simulatorexperimente in einer Laborumgebung (*kritisches Experiment*) zurückgegriffen werden. Solche Experimente ermöglichen es, den Zusammenhang zwischen Belastung bzw. Beanspruchung und der Variation von Operateurverhalten zu operationalisieren und gewährleisten dabei:

- den bisher real noch schwierig darzustellenden Situations- und Aufgabenkontext bereit zu stellen (hier: Multi-UAV-Führung aus Hubschrauberscockpit durch den Kommandanten in einer luftgestützten, militärischen Einsatzmission),
- reproduzierbare Versuchsbedingung sicherzustellen,
- mögliche Störgrößen zu reduzieren bzw. durch Konstanthalten von Variablen und Bedingungen zu kontrollieren (Standardisierung) [Zimbardo, 1988],
- eine systematische Variation des Situationskontextes durchzuführen (*unabhängige Variable*) [Zimbardo, 1988] und
- Verhaltensparameter (manuelle/visuelle Interaktionen der Versuchsperson) (abhängige Variablen) flexibel und leicht zu erfassen [Johannsen, 1993].

Mit Blick auf die Skalierung der Belastung ist Folgendes zu berücksichtigen. Im Experiment sollen sowohl Verhaltensmuster unter „normaler“ Beanspruchung als auch unter hoher Beanspruchung, d.h. im Gebiet subjektiver Anstrengung beobachtet werden. Damit sollen gezielt selbstadaptive

Strategien provoziert werden. In Abbildung 4.6 sind die entsprechenden Designpunkte durch Pfeile markiert. Um dies zu Erreichen soll die Belastung systematisch variiert bzw. gesteigert werden. Nach der in Kapitel 3 postulierten Korrelation zwischen Belastung und Beanspruchung kann somit auch die Beanspruchung gesteigert werden.

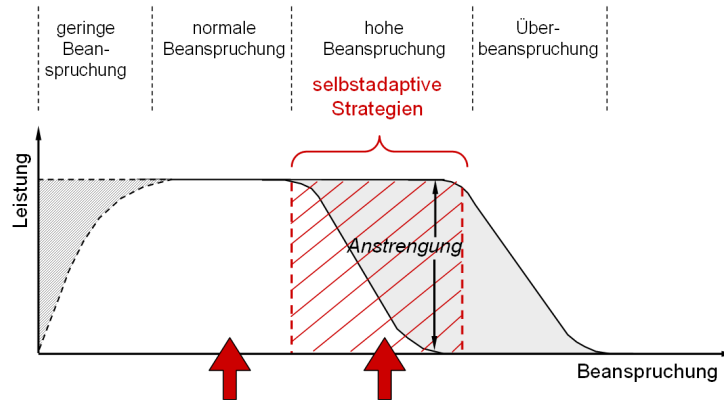


Abbildung 4.6: Beobachtung von Operateurverhalten unter normaler und hoher Beanspruchung

Zur Steigerung des Belastungsumfanges sollen im Laufe der Mission verschiedene eingebettete Nebenaufgaben aufgeschichtet werden. Allerdings bedingen Nebenaufgaben grundsätzlich einen geänderten Aufgaben- und Situationskontext und führen damit inhärent zu einer aufgabenspezifischen Veränderung des Operateurverhaltens. Die Beobachtung dieser Verhaltensänderungen erlauben jedoch keinen eindeutigen Rückschluss, ob sie nur das Resultat des geänderten bzw. erweiterten Aufgabenkontexts oder einer dadurch möglicherweise erhöhten Operateurbeanspruchung sind. Um eine rein beanspruchungsbedingte Änderung des Verhaltens zu beobachten, soll daher **eine eingebettete Nebenaufgabe definiert werden, die unabhängig von weiteren belastungssteigernden Nebenaufgaben nominal immer in der selben Art und Weise durchgeführt werden muss**. Diese wird im weiteren Verlauf als Indikatoraufgabe bezeichnet werden.

Dementsprechend soll hier der Ansatz verfolgt werden, das Verhalten des Operateurs, und dementsprechend auch beanspruchungsbedingte Verhaltensänderungen, anhand dieser eingebetteten Nebenaufgabe **als Indikator** zu untersuchen. Diese ermöglicht es, Abweichung des Verhaltens in einer entsprechend isolierten Aufgabensituation zu untersuchen. Die Gesamtbelastung wird durch eine Variation des allgemeinen Aufgabenkontextes gesteigert, während die Natur der Indikatoraufgabe unverändert bleibt. Das Verhalten der Operateure soll in Anlehnung an die im Vorfeld (Kapitel 4.2) diskutierten Aspekte der Wahrnehmungskontrolle und Umweltbeeinflussung erfasst werden. Hierfür soll die Aufmerksamkeitszuwendung der Operateure mit Hilfe von Blickbewegungsmessungen erfasst werden. Das im Rahmen der Aufgabenbearbeitung von den Operateuren geäußerte manuelle Verhalten hingegen ist anhand der Interaktionen der Operateure mit ihrem Operateurarbeitsplatz abzugreifen. Infolge der Anzeichen für Beanspruchung im verbalen Verhalten soll ferner die Cockpitkommunikation aufgezeichnet und entsprechende Interaktionsprotokolle erhoben werden.

Für die Einordnung des beobachteten Verhaltens in den hypothetischen Zusammenhang aus Beanspruchung und Leistung ist ferner die Beanspruchung der Operateure durch subjektive Befragungen in diskreten Abständen zu erheben. Auch ist die Leistung der Operateure zu erfassen. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die verwendeten Leistungsmaße sich an der für die Verhaltensbeobachtung vorgesehenen, eingebetteten Nebenaufgabe orientieren.

Kapitel 5

Experimentelle Modelldatengewinnung

Entsprechend des in Kapitel 4 beschriebenen Konzeptansatzes ist es das Ziel das Verhalten von Operateuren sowie beanspruchungsbedingte Änderungen im Verhalten an einer gezielt eingebrachten Nebenaufgabe, der so genannten Indikatoraufgabe, zu erfassen. Dies soll eingebettet in den Kontext der Führung mehrerer UAVs durch den Kommandanten (Versuchsperson) eines Hub-schraubers erfolgen. Hierfür sind die manuellen und visuellen Interaktionen der Versuchspersonen mit dem im Cockpit integrierten UAV-Operateurarbeitsplatz während der Durchführung dieser Aufgabe zu messen.

Das vorliegende Kapitel widmet sich daher eingehend dem Experimental Design zur Erfassung des Operateurverhaltens (Abschnitt 5.1), gefolgt von der Durchführung der Experimente (Abschnitt 5.2) und schließt mit einer Bewertung der Simulationsanlage durch die Operateure (Abschnitt 5.3).

5.1 Experimental Design

Zur Durchführung der Messversuche wurde ein geeignetes Experimental Design entwickelt. In diesem Zusammenhang soll zunächst die Aufgabenstellung für den Operateur, d.h. die Belastung, detailliert dargestellt werden (Abschnitt 5.1.1). Anschließend werden die Maßnahmen zur Messwerterfassung erläutert (Abschnitt 5.1.3) sowie die dafür erforderliche technische Experimentalumgebung vorgestellt (Abschnitt 5.1.4).

5.1.1 Experimentelle Aufgabenstellung

Im Rahmen der experimentellen Aufgabenstellung wird hierzu zunächst das zugrunde liegende Missionsszenario vorgestellt (Abschnitt 5.1.1.1), sowie die eingebettete Nebenaufgabe (Indikatoraufgabe) im Detail beschrieben und analysiert (Abschnitt 5.1.1.2). Abschließend erfolgt eine Darstellung der in den Experimenten angewandten Maßnahmen zur gezielten Belastungssteigerung (Abschnitt 5.1.2).

5.1.1.1 Szenario

Als Szenario wurde eine sogenannte „luftgestützte Operation“ in Anlehnung an eine militärische Einsatzmission gewählt. Diese sieht zur Aufklärung und Objektbewachung eine Verlegung eigener Truppen mit dem Hubschrauber von einer *FOB* (*Forward Operating Base*) in ein feindliches Gebiet vor (Abbildung 5.1, rechts oben). Um eine möglichst realistische Mission zu realisieren wurden für die Umsetzung im Simulator nach Möglichkeit die geltenden Einsatzvorschriften der Bundeswehr [Bundeswehr, 2007] [Bundeswehr, 2008] berücksichtigt.

Für die Durchführung der Mission wird dem Kommandanten des Hubschraubers, neben seiner eigentlichen Kommandantentätigkeit, die Führung von einem bzw. mehreren UAVs übertragen. Mit Hilfe der UAVs, welche als abgesetzte Sensorplattformen eingesetzt werden, soll sowohl eine flexible, zeitnahe Vorabauflärung der Hubschrauberoute (Hin- und Rückflugroute (*Ingress*- und *Egress* Route)), als auch des Einsatzgebietes (*HOA-Helicopter Operation Area*) und damit Truppenabsetzgebietes erreicht werden. Zeitnah bedeutet hierbei das Einhalten eines zeitlichen Abstands zwischen Hubschrauber und voraus fliegenden UAVs von wenigen Minuten. Die Steuerung der UAVs erfolgte anhand vorgeplanter Routen (Wegpunkt-basiert). Diese können während der Mission vom Kommandanten durch Einfügen, Verschieben und Löschen von Wegpunkten sowohl an die aktuelle Bedrohungslage, als auch zur besseren Informationsgewinnung adaptiert werden. Zur Aufklärung der Routen und des Einsatzgebietes verfügt jedes UAV über die gleiche Ausstattung bestehend aus Flight Management System (FMS), Radarsensor, schwenkbarer Thermalkamera, sowie einer Video-Datenverbindung, die eine Online-Objektidentifizierung und Klassifizierung an Bord des bemannten Hubschraubers ermöglicht. Die Gesamtdauer einer Mission beträgt jeweils ca. 95 Minuten.

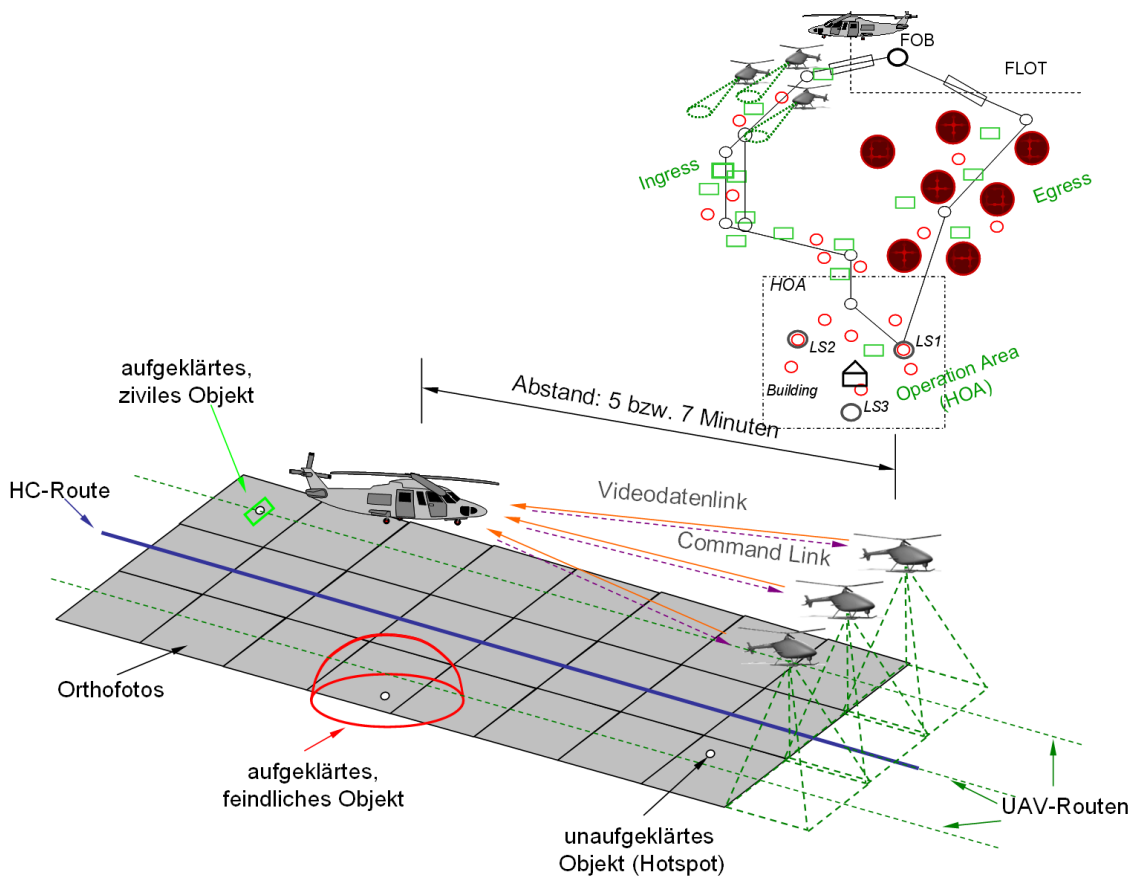


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Missionsszenarios

Neben der Führung der UAVs besteht eine wesentliche Aufgabe des Kommandanten in der Auswertung der durch die UAVs bereitgestellten Sensorinformationen. Hierbei handelt es sich um Bodenbilder (sog. Orthophotos) die von den UAVs beim Abfliegen ihrer Route erstellt (Abbildung 5.1, unten) und unmittelbar auf den UAV-Operateurarbeitsplatz in die dort vorhandene Kartendarstellung übertragen werden. Die Aufgabe des Operateurs ist es, diese Bodenbilder nach möglichen Objekten zu überprüfen. Diese Objekte erscheinen für den Operateur als pixelgroße weiße Punkte (sog. Hotspots). Die Identifikation dieser Hotspots, das Klassifizieren des sich dahinter befindlichen Objektes, sowie das Eintragen des gewonnenen Aufklärungsergebnisses in das System stellt dabei die im Rahmen der Mission gewählte eingebettete Nebenaufgabe dar. Sie wird detailliert in Abschnitt 5.1.1.2 erläutert.

Da das Verhalten der Versuchspersonen in der Durchführung dieser Aufgabe untersucht werden soll, ergeben sich für die Ausgestaltung des Szenarios und damit für die Umsetzung im Simulator nachfolgend aufgeführte Randbedingungen, die zu berücksichtigen sind:

- *Die zu untersuchende Indikatoraufgabe soll mehrfach reproduzierbar während des Missionsablaufs eingearbeitet werden (vgl. Abschnitt 5.1.1.2).*
Ziel ist es, möglichst viele Datensätze für das Operateurverhalten bei der Bearbeitung dieser Aufgabe zu erhalten.
- *Mehrfachaufgabensituationen bei der Indikatoraufgabe sollen vermieden werden.*
Mehrfachaufgabensituationen, beispielweise hervorgerufen durch das gleichzeitige Entdecken zweier Objekte in einem Bodenbild, können zu einer unerwünschten Verhaltensänderung führen. Um diesen zu entgegnen, ist auf einen ausreichenden Abstand platzierter Objekte in den Bodenkachelbildern zu achten, schematisch dargestellt in (Abbildung 5.2).

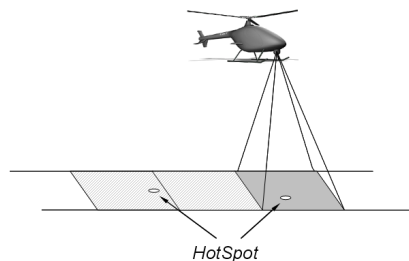


Abbildung 5.2: Schematische Abbildung erzeugter Bodenkachelbilder der UAVs, sowie die Entzerrung der Hotspots zur Vermeidung von Mehrfachaufgabensituationen

- *Lerneffekte, im Sinne erwartungsbasierten Verhaltens von Versuchspersonen, sollen möglichst vermieden werden.*
Im Rahmen von Vorversuchen zeigte sich, dass sich die Versuchspersonen bei zeitlich kurz hintereinander durchgeführten Missionen Routenverläufe, sowie die Positionen von Objekten einprägen. Unter Verwendung dieses Wissens, führte dies in der nachfolgenden Mission zu einem teilweise geänderten, deutlich auf Erwartungen basierten Verhalten, welches unerwünschte Effekte hinsichtlich der Herangehensweise bei der Aufgabendurchführung zur Folge hatte. Dies äußerte sich beispielsweise in einem vorab Ausrichten der UAV-Kameras auf markante Objektpositionen, oder dem Suchen nach vermeintlich vorhandenen Objekten an zuvor eingetragenen Positionen. Um derartiges Verhalten zu vermeiden, sollen für die gewählten Messmissionen die Routenverläufe und die Positionen der aufzuklärenden Objekte deutlich verändert werden. Dies ist in Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 angedeutet. Hierbei sind die Missionsaufgaben dieselben, jedoch die geometrische Anordnung stark unterschiedlich.

- *Vergleichbarkeit soll gewährleistet werden.*

Um eine inter- und intraindividuelle Vergleichbarkeit zwischen der Führung von einem und drei UAVs zu erhalten, ist bei der Auslegung der entsprechenden Streckenführungen darauf zu achten, dass sowohl die Gesamt-Missionsdauer, sowie die der Teilstreckenabschnitte Hinflugroute, Einsatzgebiet, Rückflugroute, aber auch die Anzahl der positionierten Objekte auf den einzelnen Teilabschnitten möglichst einheitlich ist.

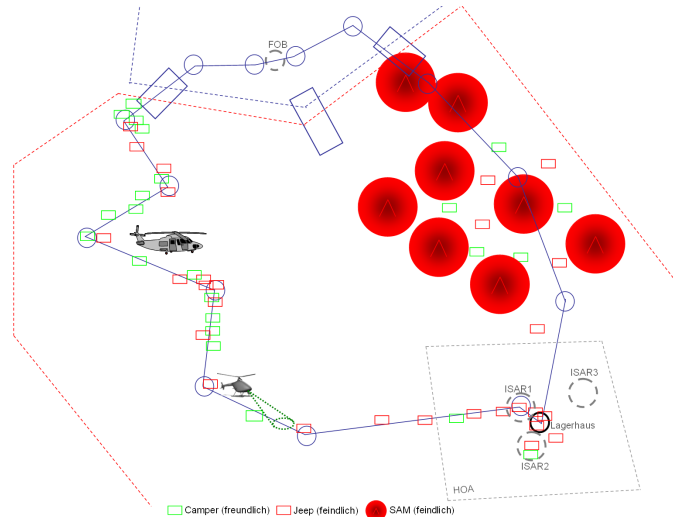


Abbildung 5.3: Missionsverlauf inklusive aufzuklärender Objekte, sowie SAM-Stellungen für die FMS-basierte Führung mit 1 UAV

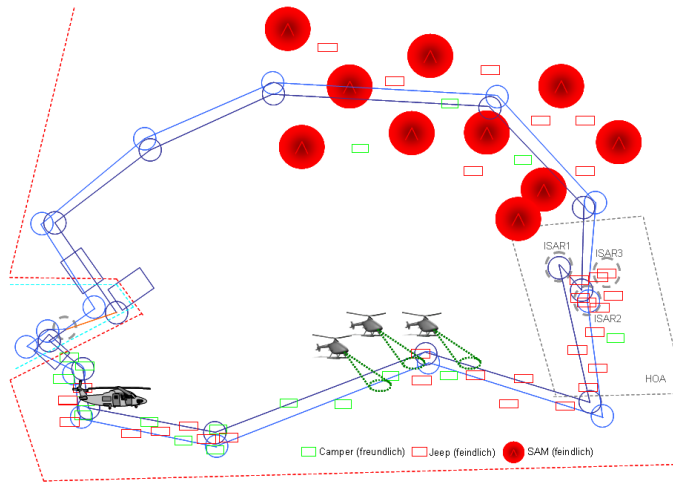


Abbildung 5.4: Missionsverlauf FMS-basierte Führung mit 3 UAVs einschließlich aufzuklärender Objekte, sowie SAM-Stellungen

5.1.1.2 Indikatoraufgabe und Aufgabendekomposition

Mit der dem Kommandanten neu übertragenen Aufgabe, der Führung und Überwachung mehrerer UAVs zur zeitnahen Vorabauklärung der Hubschrauberroute und des Einsatzgebietes, ergibt sich für den Kommandanten ein neues Aufgabenspektrum. Dieses setzt sich im Wesentlichen aus den folgenden übergeordneten Aufgaben zusammen (vgl. Abbildung 5.5):

- *Missionsmanagement* - Diese Aufgabe umfasst alle notwendigen Planungs- und Umplanungsaufgaben des Kommandanten bezüglich der UAV- bzw. der Hubschrauberoute(n). Typische Umplanungssituationen finden sich beispielsweise bei der Aufklärung von Landezonen, sowie zur Gefahrenreduzierung im Falle bedrohter Flugwege.
- *Objektsuche* - Die Objektsuche sieht das Durchsuchen der von den UAVs aufgenommenen Orthophotos nach möglichen Objekten durch den Kommandanten vor.
- *Objektidentifizierung* - Sie umfasst das Erkennen des Objektes, dargestellt zunächst als Hotspot in einem UAV-Bodenkachelbild, das Identifizieren des Objektes mit einem Infrarot-Live-Videokamerastream des selektierten UAVs, sowie das Eintragen des Klassifikationsergebnisses in das System. Diese Teilaufgabe stellt im weiteren Verlauf der Arbeit die Indikatoraufgabe dar, an der das Verhalten der Operateure unter variierenden Belastungs- und Beanspruchungsbedingungen beobachtet werden soll.
- *SAM-Lokalisierung* - Im Falle von Radarerfassung der UAVs bzw. des Hubschraubers durch eine SAM-Stellung ist die zugehörige SAM-Position zu ermitteln und in das System einzutragen.

Die Objektidentifizierung als Indikatoraufgabe wird im Folgenden detaillierter betrachtet. Sie beginnt mit dem Entdecken eines Objektes in den Bodenbildern durch den Operateur. Dieses Objekt ist durch den Operateur als aufzuklärendes Objekt zu markieren und die Kamera eines selektierten UAVs darauf auszurichten. Für die Klassifikation des Objektes als freundlich oder feindlich muss der Operateur in einen dafür vorgesehenen Sensor-Mode (CAM-Mode) wechseln, in dem ihm ein Live-Videobild des Objektes dargestellt wird. Mit Treffen der Klassifikationsentscheidung ist dieses Aufklärungsergebnis durch den Operateur in das System einzutragen, so dass diese Information auch für den Piloten des Hubschraubers in seiner Kartendarstellung zugänglich wird.

Die hier betrachtete Indikatoraufgabe lässt sich damit im Wesentlichen in die folgenden drei Teilaufgaben (Abbildung 5.5) unterteilen:

- „*recognise and tag*“ - Diese Teilaufgabe umfasst den Zeitabschnitt zwischen der Erkennung des Hotspots durch den Operateur und der Markierung des Hotspots in der Karte.
- „*classify*“ - Diese Phase beginnt mit der Ausrichtung der Kamera auf das aufzuklärende Objekt. Durch Verwendung eines Live-Infrarot-Videostreams des aktuell selektierten UAVs erfolgt daraufhin die Klassifikation des Objektes durch den Operateur als freundlich oder feindlich.
- „*insert result*“ - Diese Teilaufgabe sieht das Eintragen des Objektklassifizierungsergebnisses in das System vor.

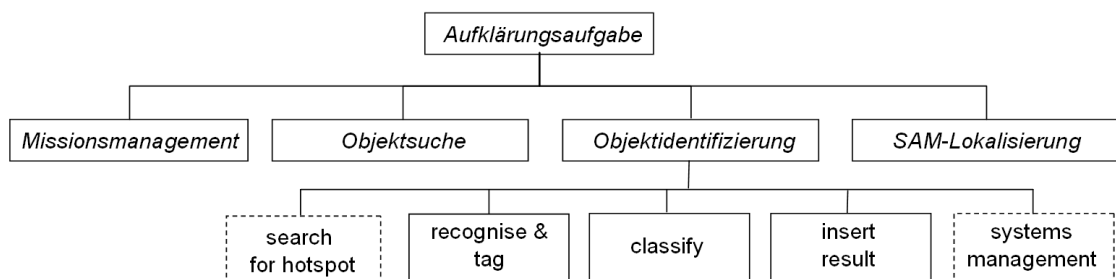


Abbildung 5.5: Übergeordnete Aufgaben des UAV-Operators im Missionsverlauf

Die Teilaufgaben „*search for hotspot*“ und „*system management*“ sind in Abbildung 5.5 aus Gründen der Vollständigkeit mit aufgeführt. Hierbei handelt es sich um Teilaufgaben, die unmittelbar an die eigentliche Objektidentifizierung angrenzen.

So umfasst die Teilaufgabe „*search for hotspot*“ den Zeitabschnitt vom Auftauchen des Hotspots im Display, bis zum Erkennen des Hotspots durch den Operateur. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass der Operateur den Hotspot erkennt und wahrnimmt, wenn er diesem seine visuelle Aufmerksamkeit erstmals zuwendet.

Die Teilaufgabe „*system management*“ tritt in der Regel nach dem Eintragen des Klassifikationsergebnisses in das System auf. Sie umfasst verschiedene Systembedienaktionen des Operateurs, um wieder in die Ausgangsbedingung für die nächste Suche nach einem Hotspot zu gelangen.

Da beide Teilaufgaben lediglich im unmittelbaren Umfeld der Indikatoraufgabe stehen, jedoch keine Auswirkung auf ihre Durchführung besitzen, werden sie im Folgenden nicht weiter untersucht.

Hingegen sollen die verbleibenden Teilaufgaben detaillierter betrachtet werden. Hierfür werden diese Teilaufgaben (*subtasks*) in weitere Unteraufgaben (*sub-subtasks*) zerlegt. Diese stehen dann wiederum meist in direktem Zusammenhang mit bestimmten, beobachtbaren manuellen und visuellen Aktionen (*actions*).

5.1.1.2.1 Zerlegung der Teilaufgabe „*recognise and tag*“ Diese Teilaufgabe beginnt mit der Detektion des Hotspots durch den Operateur (*recognise hotspot*) und endet im Allgemeinen mit dem Markieren des Hotspots durch ein Fragezeichen, als aufzuklärendes Objekt in der Karte (*add tag, select hotspot*) (vgl. Abbildung 5.6). In Abhängigkeit von der gegenwärtig untersuchten Konfiguration (Führung von 1 oder 3 UAVs), sowie unterschiedlichen Voreinstellungen (z.B. Zoomstufe, Suchmodus) können weitere Unteraufgaben erforderlich sein. Diese unterliegen keiner bestimmten Reihenfolge. So beispielsweise:

- *select UAV*: Sie steht für das Anwählen des UAVs mit dem das Objekt im Videostream klassifiziert werden soll. Dieser Vorgang ist in der Konfiguration mit drei UAVs erforderlich, da gleichzeitig immer nur der Videostream eines UAVs betrachtet werden kann. Für gewöhnlich wird hierfür das UAV gewählt, das das Bodenbild von dem Objekt erstellt hat, respektive das UAV, das die geringste Entfernung zum Objekt besitzt.
- *select search mode*: Diese Unteraufgabe steht für den Wechsel des aktuell selektierten Suchmodus. So stehen dem Kommandanten für die Suche nach Objekten zwei unterschiedliche Suchmodi zur Verfügung. Die Suche nach Objekten durch manuelles Verschieben der Karte (SLEW-Mode), oder das automatische Verschieben der Karte in Abhängigkeit der Position des aktuell selektierten UAVs (UAV-Mode). Entdeckt der Kommandant einen Hotspot im UAV-Mode, muss er für die Markierung des Objektes, ein weiteres automatisches Verschieben der Karte durch den Wechsel in den SLEW-Mode vermeiden. Da dieser Wechsel des Suchmodus nur im Displayformat für die Flugführungsaufgaben (FMS-Mode) des Multi-Funktionsdisplays zur Verfügung steht, treten demzufolge zusätzlich die Unteraufgaben *change to FMS-Mode* und *change to RECCE-Mode* auf. Sie bezeichnen den jeweiligen Wechsel in das entsprechende Displayformat.
- *center hotspot*: Diese Unteraufgabe sieht das Verschieben des Hotspots in den zentralen Kartenbereich vor. Sie tritt im Allgemeinen auf, wenn sich ein erkannter Hotspot in den Randbereichen der dargestellten Karte befindet.
- *change field of view*: Diese Aufgabe bezeichnet die durch den Operateur vorgenommene Adaption der Zoomstufe, für eine verbesserte Erkennung und Bedienbarkeit des Hotspots.
- *move tag*: Sie sieht das Verschiebung einer bereits gesetzten Markierung vor und wird von den Operateuren verwendet, wenn die Markierung für das aufzuklärende Objekt versehentlich zu weit entfernt vom Hotspot gesetzt wurde. Damit verbunden sind die zusätzlichen Unteraufgaben *select tag* und *select hotspot*. Sie bezeichnen die Aktivierung der Markierung zum Verschieben, sowie Vorgabe des Hotspot als neue Position für die Markierung.

- *delete tag*: Alternativ besitzt der Operateur die Möglichkeit eine falsche Positionierung des Markierungspunktes wieder zu löschen. Damit verbunden ist ein erneuter Markierungsvorgang, charakterisiert durch die Unteraufgaben *add tag* und *select hotspot*.

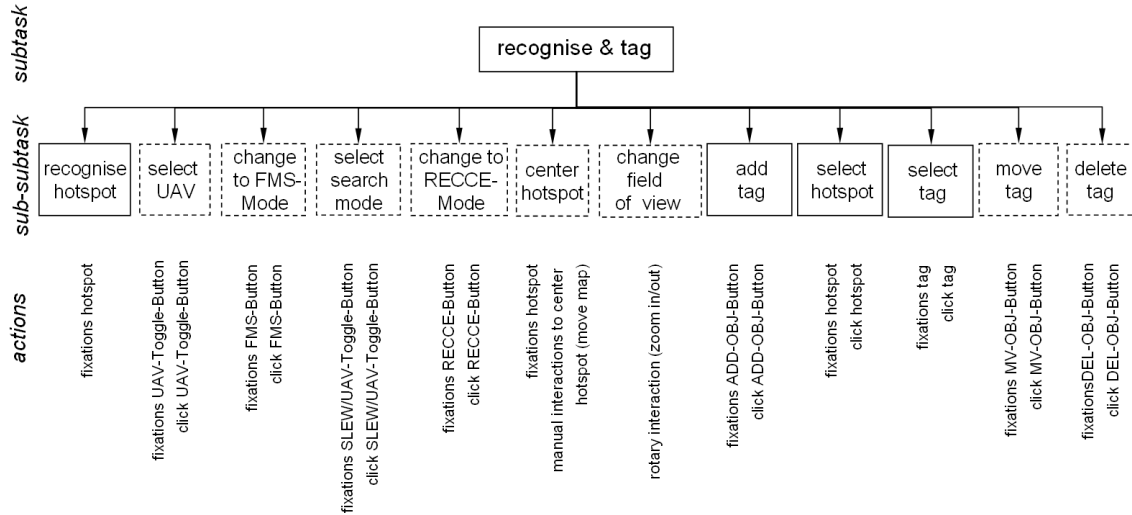


Abbildung 5.6: Unteraufgaben der Teilaufgabe „recognise and tag“ einschließlich idealer manueller und visueller Interaktionen

5.1.1.2.2 Zerlegung der Teilaufgabe „classify“ Diese Teilaufgabe umfasst die für den Operateur erforderlichen Unteraufgaben für eine Klassifizierung des bisher lediglich als Hotspot dargestellten Objektes (vgl. Abbildung 5.7). Sie beginnt mit

- der Ausrichtung der Kamera auf das noch aufzuklärende Objekt (*direct cam to hotspot, select hotspot*),
- dem Wechsel des Displayformats in den CAM-Mode zur Darstellung des Live-Infrarot-Videostreams (*change to cam mode*),
- gefolgt von der Ausrichtung der Kamera auf das zuvor angewählte Objekt (*get object video stream*),
- der Zentrierung des Objektes im Live-Stream für eine verbesserte Erkennung (*center object*),
- dem Heranzoomen des Objektes (*change field of view*) zur eindeutigen Klassifikation als freundliches oder feindliches Objekt und schließlich
- dem Wiederherstellen der Ausgangsbedingungen, charakterisiert durch die vertikale Ausrichtung der Kamera nach unten, um neue Bodenbilder des UAVs zu erhalten (*switch to orthophoto-mode*).

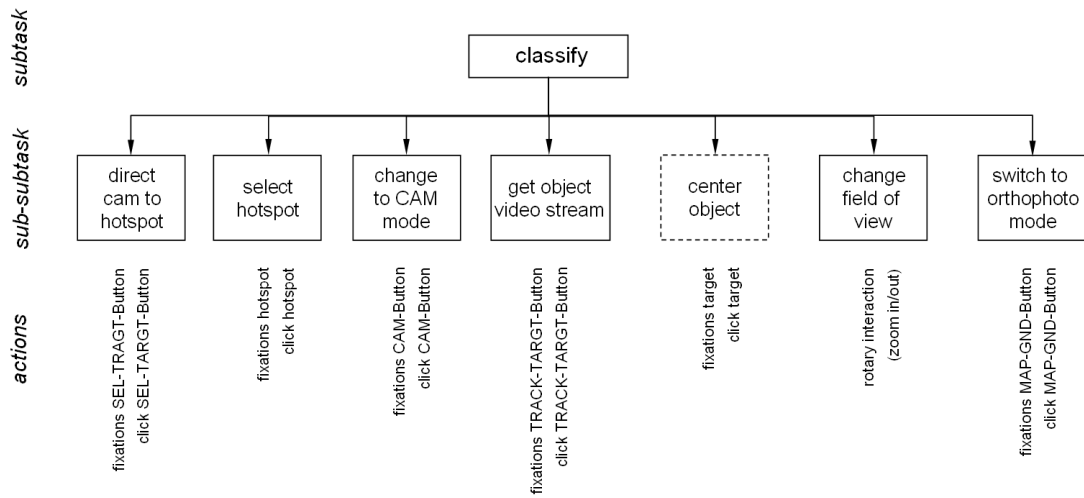


Abbildung 5.7: Unteraufgaben der Teilaufgabe „classify“ einschließlich idealer manueller und visueller Interaktionen

Diese Teilaufgabe ist per se stark sequentiell geprägt. Eine Variation in der Sequenz der Bearbeitung von Unteraufgaben ist lediglich in den Unteraufgaben *center object* und *change field of view* möglich. Darüber hinaus können diese beiden Unteraufgaben mehrfach in der Bearbeitung der Klassifikationsaufgabe auftreten, um so eine eindeutige Klassifikation, durch optimale Sichtbarkeit des Objektes zu erreichen.

5.1.1.2.3 Zerlegung der Teilaufgabe „insert result“ Die letzte Teilaufgabe der Objektklassifizierung sieht das Eintragen des gewonnenen Klassifikationsergebnisses durch den Operateur in das System vor. Hierfür muss der Operateur aus dem CAM-Mode der Klassifizierung zurück in den RECCE-Mode wechseln (*change to RECCE mode*), und dort den bisher mit einem Fragezeichen versehenen Hotspot als freundlich oder feindlich in der Karte zu kennzeichnen (*select classification, select hotspot*) (Abbildung 5.8).

Zudem können auch in dieser Teilaufgabe weitere, bereits bekannte Unteraufgaben wie *add tag*, *change to CAM mode* und *switch to orthophoto mode* auftreten. Für die Kennzeichnung eines Objekts als freundlich oder feindlich ist zuvor eine Markierung des Hotspots durch ein Fragezeichen erforderlich. Wurde diese Unteraufgabe in der Teilaufgabe „recognise and tag“ vergessen, oder absichtlich unterlassen, muss sie in dieser Teilaufgabe vor dem Eintragen des Klassifikationsergebnisses nachgeholt werden. Die Unteraufgaben *change to CAM mode* und *switch to orthophoto mode* treten auf, wenn Operateure in der Teilaufgabe „classify“ vergessen haben, die Kamera des UAVs wieder in Ausgangsstellung für weitere Bodenaufnahmen zu bringen.

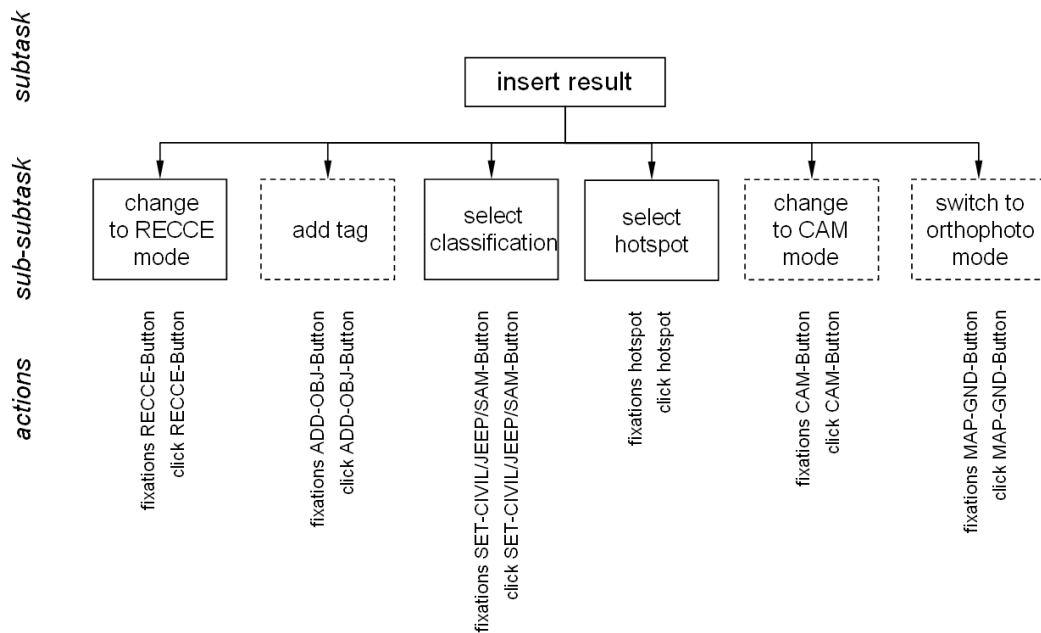


Abbildung 5.8: Unteraufgaben der Teilaufgabe „insert result“ einschließlich idealer manueller und visueller Interaktionen

5.1.1.2.4 Idealer Ablauf der Indikatoraufgabe Für die Durchführung der Indikatoraufgabe sind die in den Abbildungen 5.6, 5.7, 5.8 durchgehend umrandeten Unteraufgaben erforderlich. Unteraufgaben, die hingegen gestrichelt umrandet sind, stellen sowohl ein situationsangepasstes, als auch ein individuelles Vorgehen der Operateure dar. Sie führen dazu, dass die Bearbeitung der Objektidentifizierung in einer Vielzahl unterschiedlicher Unteraufgaben- und damit Aktionssequenzen erfolgen kann, ohne dass dabei von einer fehlerhaften Ausführung die Rede sein kann. Unter Vernachlässigung dieser optionalen Unteraufgaben, ergibt sich ein optimaler Ablauf für die Durchführung der Objektidentifizierungsaufgabe. Eine Darstellung dieser idealen Sequenz in der Bearbeitung der Objektidentifizierungsaufgabe findet sich in Abbildung 5.9. Tabelle 5.1 fasst hierzu die dafür notwendigen Unteraufgaben zusammen.

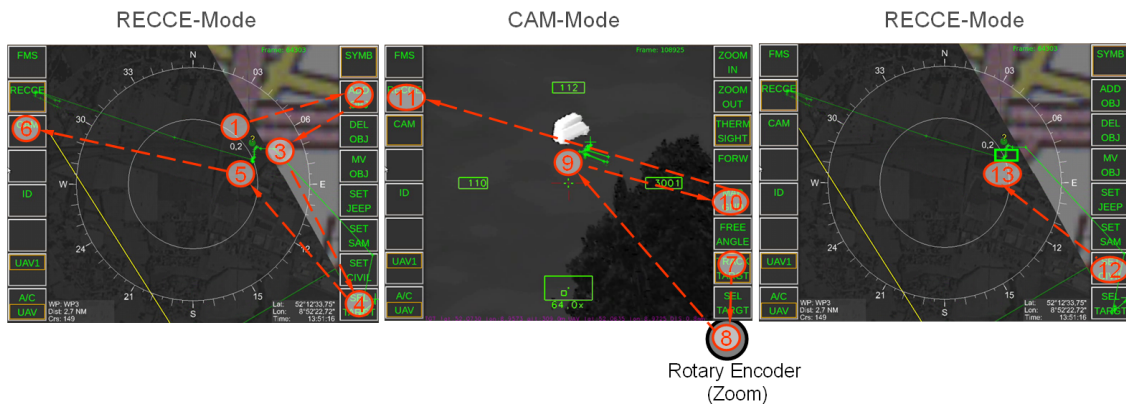


Abbildung 5.9: Optimaler Ablauf der Bearbeitung der Objektidentifizierungsaufgabe

TEILAUFGABE	UNTERAUFGABEN
<i>recognise and tag</i>	(1) recognise hotspot, (2) add tag, (3) select hotspot
<i>classify</i>	(4) direct cam to hotspot, (5) select hotspot, (6) change to CAM mode, (7) get object video stream, (8) change field of view, (9) center object, (10) switch to orthophoto mode
<i>insert result</i>	(11) change to RECCE mode, (12) select classification, (13) select hotspot

Tabelle 5.1: Optimale Sequenz der Durchführung der Objektidentifizierung

5.1.2 Belastungsvariation

Ziel der experimentellen Datengewinnung ist es, Operateurverhalten in unterschiedlichen Belastungs- und damit Beanspruchungssituationen zu analysieren. Um dies zu ermöglichen ist die Belastung des Operateurs im Situationskontext gezielt und sukzessive zu steigern, ohne dabei eine unmittelbare Auswirkung auf die Bearbeitung der Indikatortaufgabe zu bewirken. Da die für eine Überforderung von Operateuren erforderliche Belastung nicht bekannt ist, wird die Belastung sowohl innerhalb einer durchzuführenden Mission, als auch zwischen den beiden durchgeführten Messmissionen systematisch gesteigert (schematisch dargestellt in Abbildung 5.10).

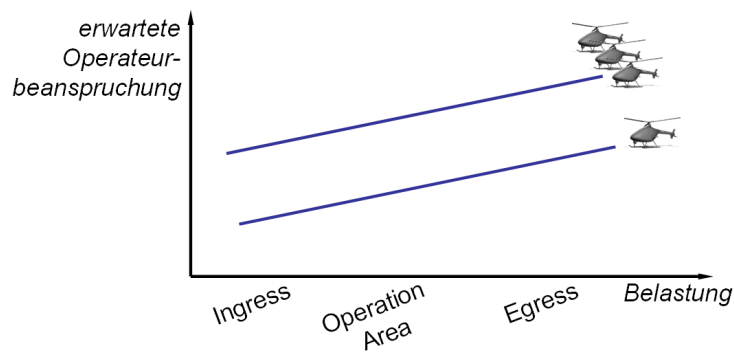


Abbildung 5.10: Variation der Belastung

- *Belastungssteigerung im Missionsverlauf* - Der Missionsverlauf lässt sich in drei grundlegende Segmente unterteilen, dem Hinflug zum Einsatzgebiet (*Ingress*), dem Aufenthalt im Einsatzgebiet bzw. Truppenabsetzgebiet (*HOA*) und dem Rückflug zur FOB (*Egress*). In diesen Missionssegmenten erfolgt eine stufenweise Belastungssteigerung durch Hinzufügen von zusätzlichen eingebetteten Nebenaufgaben, sowie durch Vorgabe zeitlicher Randbedingungen. Eine detaillierte Darstellung der hier durchgeführten Belastungssteigerung ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Diese Belastungssteigerung innerhalb des Missionsverlaufes, findet sowohl in der Messmission 1, als auch in Messmission 2 Anwendung.

MISSIONSSEGMENT	NEBENAUFGABEN	ZEITVORGABEN
Ingress		Zeitvorgabe für das Absetzen der Truppen
HOA	Umplanung der HC-/UAV-Routen bei bedrohter Landezone zu einer Ausweichlandezone	Zeitvorgabe für das Absetzen der Truppen
Egress	SAM-Lokalisierung + Umplanung der UAV-/HC-Routen	Zeitvorgabe für das Verlassen des feindlichen Gebietes durch den gesicherten Korridor

Tabelle 5.2: Belastungssteigerung im Missionsverlauf

- *Belastungssteigerung zwischen Messmission 1 (1 UAV) und Messmission 2 (3 UAVs)* - Um die Belastung zwischen den beiden untersuchten Konfigurationen zu erhöhen, wurden folgende Maßnahmen ergriffen:
 - *Steigerung der Aufgabenkomplexität.* Hierfür wurde die Anzahl der durch den Operateur zu führenden UAVs von einem auf drei UAVs erhöht. Dies führt dazu, dass der Operateur in Messmission 2 nun die Aktivitäten von drei UAVs koordinieren muss. Trotz des damit verbundenen Mehraufwands an geistigen und körperlichen Tätigkeiten ändert sich die nominale Bearbeitung der Indikatoraufgabe nicht.
 - *Änderung der zeitlichen Randbedingung.* Zur Erhöhung der Belastung wurde bei der Führung von drei UAVs zudem der zeitliche Abstand zwischen Hubschrauber und voraus fliegenden UAVs von sieben auf fünf Minuten reduziert. Hierdurch wird ein gewisser zusätzlicher Zeitdruck aufgebaut.

5.1.3 Experimentelle Messwerterfassung und Datenerhebung

Die Erfassung des Operateurverhaltens erfolgt anhand beobachtbarer Handlungen der Versuchsperson. Hierzu werden im Rahmen dieser Arbeit die manuellen und visuellen Interaktionen des Operators mit dem UAV-Operateurarbeitsplatz betrachtet. Das von den Versuchspersonen während der Bearbeitung einer Aufgabe gezeigte Verhalten setzt sich im Allgemeinen aus Sequenzen ausgeführter Einzelaktionen zusammen und bildet damit aufgabenspezifische Verhaltensmuster. Die Erfassung der manuellen und visuellen Einzelaktionen erfolgt zunächst parametrisch, d.h. in Form von Positionsangaben (z.B. Blickort, Berührungspunkt auf dem Display). Eine ausschließlich geometrische Beschreibung des Operateurverhaltens anhand von z.B. Blickpunktskoordinaten ist jedoch aufgrund der sich kontinuierlich ändernden Informationsdarstellung auf den Multifunktionsdisplays und die darin integrierte dynamische Kartendarstellung unzureichend, um weitergehende Auswertungen vorzunehmen. Um eine beanspruchungsbedingte Änderung identifizieren zu können, ist daher die Zuweisung der semantischen Bedeutung zu den Interaktionen (z.B. „Blick auf UAV1“) vorzunehmen. Dies ermöglicht es unabhängig von der Art der Informationsdarstellung bestimmte Verhaltensweisen zu identifizieren. Hierfür ist es erforderlich neben den Koordinaten der Interaktionen auch den jeweiligen Informationsgehalt der entsprechenden Systemfunktion zu erfassen.

Um das gemessene Verhalten zudem einem Beanspruchungsbereich (z.B. normale Beanspruchung, hohe/kritische Beanspruchung, Überforderung) zuordnen zu können, sollen zusätzlich die Leistung sowie die subjektiv empfundene Beanspruchung der Versuchspersonen erfasst werden. Darüber hinaus werden zusätzlich die Cockpitkommunikation und das Situationsbewusstsein protokolliert.

Die Aufzeichnung der Cockpitkommunikation (vgl. Kapitel 5.1.3.7) dient als unterstützendes Maß für die nachträglich durchzuführenden Videoanalysen, um leichter in das zurückliegende Geschehen

hinein zu finden. Ferner kann die Cockpitkommunikation als weiterer Indikator für die Beanspruchung herangezogen werden [Katz u. a., 1998] [Silberstein und Dietrich, 2003] [Parasuraman und Rovira, 2005] (vgl. Anhang A).

Um ferner einen Eindruck zu erhalten, welche Auswirkungen die dem Kommandanten des Hub-schraubers neu übertragene Aufgabe der Multi-UAV-Führung auf sein Situationsbewusstsein besitzt, wird in diskreten zeitlichen Abständen eine objektive Erfassung des Situationsbewusstseins der Versuchspersonen durchgeführt.

Die folgenden Abschnitte widmen sich nun der experimentellen Erfassung der einzelnen Größen.

5.1.3.1 Erfassung visueller Interaktionen

Das visuelle Verhalten der Versuchspersonen während der Aufgabenbearbeitung äußert sich in Blickpfaden („*scanpath*“). Diese sind am Wechsel von Fixationen und Sakkaden (Anhang G) beobachtbar. Die zeitliche, wie auch räumliche Ausprägung dieser Blickpfade werden im Wesentlichen durch zwei unterschiedliche mentale Verarbeitungsstrategien beeinflusst.

So ist ein grundlegender Bestandteil des Blickverhaltens durch den Aufgabenkontext, das Wissen sowie erlernten Strategien (Vorgehensweisen, Schemata) und Wünschen des Operators charakterisiert. In diesem Zusammenhang spricht man von *globalen Blickpfaden* basierend auf sogenannten *Top-Down*-Verarbeitungsmechanismen. Diese Mechanismen setzen ein internes Vorgehensmodell für die Bearbeitung der Aufgabe voraus, durch das es dem Operator möglich ist, seine visuelle Aufmerksamkeit zur gezielten Informationsaufnahme auszurichten [Kootstra u. a., 2006] [Schulte, 1996]. Neben diesen *Top-Down*-Mechanismen wird das Blickverhalten auch durch die über die Sinne wahrgenommenen Stimuli beeinflusst. Ein derartig reizgesteuertes Blickverhalten spiegelt sich im Allgemeinen in *lokalen Blickpfaden* wider [Rötting, 2001]. Ursache hierfür sind *Bottom-Up*-Verarbeitungsmechanismen [Schulte, 1996], die sich z.B. an der Auffälligkeit von visuellen Reizen orientieren, nicht aber in erster Linie an deren Bedeutung für die Aufgabe. Beide Verhaltensweisen sind anhand von Blickbewegungsmessungen beobachtbar.

Der Begriff der Blickbewegungen umfasst nach [Seifert u. a., 2001] [Rötting, 2001] [Joos u. a., 2002] alle Bewegungen des Auges, die in Verbindung mit dem vom Auge aufgenommenen Informationen stehen. Demzufolge bedarf es bei der Blickbewegungserfassung nicht nur der Erfassung der Augenbewegungen der Versuchspersonen, sondern auch der zugehörigen Blickziele [Link u. a., 2008].

Blickbewegungserfassung

Zur Erfassung von Augen- und Blickbewegung existiert eine Vielzahl verschiedener Verfahren (z.B. direkte Beobachtung, Elektrookulogramm, Kontaktlinse, videobasierte Verfahren). Für eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Verfahren und ihrer Eigenschaften wird auf [Rötting, 2001] verwiesen.

Im Folgenden werden hier kurz videobasierte Verfahren, sowie die unterschiedlichen Methoden zur Erfassung der Augenbewegungen im Rahmen videobasierter Verfahren, vorgestellt. Dieses Verfahren, sowie einige der nachfolgend aufgeführten Methoden finden auch in *faceLAB* [seeingmachines, 2009] Verwendung, dem im Rahmen der Experimente verwendeten Messsystem.

So nutzt *faceLAB* für die Ermittlung der Augen-/Blickbewegungen im *Precision Mode* Pupillen- und Cornea-Reflex-Tracking. Bei reduzierter Qualität empfangener Daten, abhängig von der besseren Erkennungsleistung, hingegen nur mehr Limbus- bzw. Pupillentracking.

Grundsätzlich ermöglichen videobasierte Verfahren Augen-/Blickbewegungen von Versuchspersonen unter Verwendung von Lichtreflexionen nicht-invasiv zu erfassen. Hierfür arbeiten sie mit

entsprechend lichtempfindlichen Sensorkameras. Diese erfassen das Bild des Auges und leiten es zur einer rechnergestützten Auswertung weiter. Im Rahmen dieser Auswertung erfolgt eine Extraktion interessanter Merkmale wie beispielsweise Reflexionen, Pupille, Limbus. Zur Extraktion dieser Merkmale existieren verschiedene Verfahren, die auf der Reflexion des Lichtes vom Auge basieren. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Limbus Tracking:

Der Limbus stellt prinzipiell die Grenze zwischen Cornea (Hornhaut) und Sclera (Lederhaut) dar. Im Rahmen des Limbus Tracking wird jedoch im Allgemeinen der Übergang zwischen Iris und Sclera betrachtet. Infolge des damit gegebenen Kontrastverhältnisses ist es möglich diese Grenze mit Hilfe optischer Methoden zu identifizieren. Da der Limbus teilweise durch die Augenlider verdeckt werden kann, eignet sich diese Methode im Wesentlichen für die Erfassung horizontaler Augenbewegungen.

Pupillen-Tracking:

Ähnlich dem Limbus-Tracking wird hier die Grenze zwischen Pupille und Iris betrachtet. Der hierbei betrachtete Kontrast ist geringer als jener der, der Limbus-basierten Methode, jedoch deutlich schärfer abgegrenzt und in Regel seltener durch das Augenlid bedeckt.

Cornea-Reflex und Pupillen-Tracking:

Der Cornea-Reflex (erster Purkinje-Reflex) entsteht durch die Reflexion einer punktförmigen Infrarotlichtquelle auf der Hornhaut des Auges (Abbildung 5.11). Diese Methode verwendet die Positionsdifferenz zwischen dem Pupillenmittelpunkt und dem Cornea-Reflex, der oftmals auch als „glint“ bezeichnet wird. Bei seitlichen Verschiebungen des Kopfes verändert sich die relative Position der beiden Messpunkte nicht. Bei Drehungen des Auges hingegen verschiebt sich der Cornea-Reflex gegenüber dem Pupillenmittelpunkt systematisch (Abbildung 5.11), woraus die Blickposition bestimmt werden kann [Duchowsky, 2007]. Die Ermittlung der Lage der beiden Punkte erfolgt durch Verfahren der automatischen Bildverarbeitung. Mit Hilfe der hier erfassbaren Distanz zwischen Pupille und Cornea-Reflex besteht die Möglichkeit eine Blickachsmessung („*point of regard measurement*“) durchzuführen [Joos u. a., 2002].

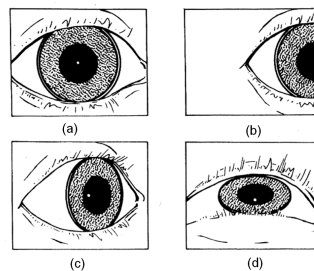


Abbildung 5.11: Relative Verschiebung des Cornea-Reflex bei Bewegung des Kopfes (a)->(b) und Augenbewegungen (a)->(c)->(d) [Merchant u. a., 1974]

Messung der Blickbewegungen mit faceLAB:

faceLAB verwendet für die Ermittlung von Reflexionen, Augen- und Kopfmerkmalen eine Sensorik bestehend aus einem aktiv Infrarotpod sowie zwei passiven FireWire-Kameras. Diese Sensorik wird für die Erfassung der Blickbewegungen der Versuchspersonen mittig oberhalb der Displays des UAV-Operateurarbeitsplatzes positioniert. Ziel ist es durch diese Positionierung eine mögliche Verdeckung der Kameras bzw. des IR-Pods infolge manueller Interaktionen der Versuchspersonen mit den Displays zu verhindern. Als Kopfmodell wird für jeden Probanden ein Frontalsicht-Modell

erstellt. Dieses limitiert die maximale Bewegungsfreiheit der Kopfausrichtung auf ± 30 Grad in lateraler Richtung. Da jedoch ausschließlich das Blickverhalten auf den Multifunktionsdisplays von Interesse ist, ist dieser Messbereich mehr als ausreichend. Um neben Kopf-, Augen- und Blickdaten zusätzlich die Durchtrittspunkte des Blickes mit dem UAV-Operatorarbeitsplatz zu erhalten, wird dieser hinsichtlich seiner Geometrie, Auflösung und Lage in faceLAB modelliert.

Die von faceLAB bereitgestellten Daten werden systemintern in entsprechenden Datenfiles aufgezeichnet, als auch über eine TCP/IP Netzwerk-Schnittstelle an einen Server zur Weiterverarbeitung gesendet (vgl. Abbildung 5.12). Hier werden die faceLAB-Daten konvertiert (z.B. Framenummer, Blickpositionen, Displayinteraktion, Sakkaden), Zeitstempel der Simulation hinzugefügt und über Interprozesskommunikation (Mico-Corba) anderen Modulen (z.B. Logging-Funktionsmodulen, Interaktionsmonitor) in der Simulationsumgebung zur Verfügung gestellt.

Ferner erfolgt eine Datenaufzeichnung der Augenbewegung in Form einer Videoaufzeichnung (faceLAB-scenecam). Hierbei wird das Videobild einer fest in der Simulationsumgebung installierten Szenenkamera mit den Augenbewegungen der Versuchsperson überlagert.

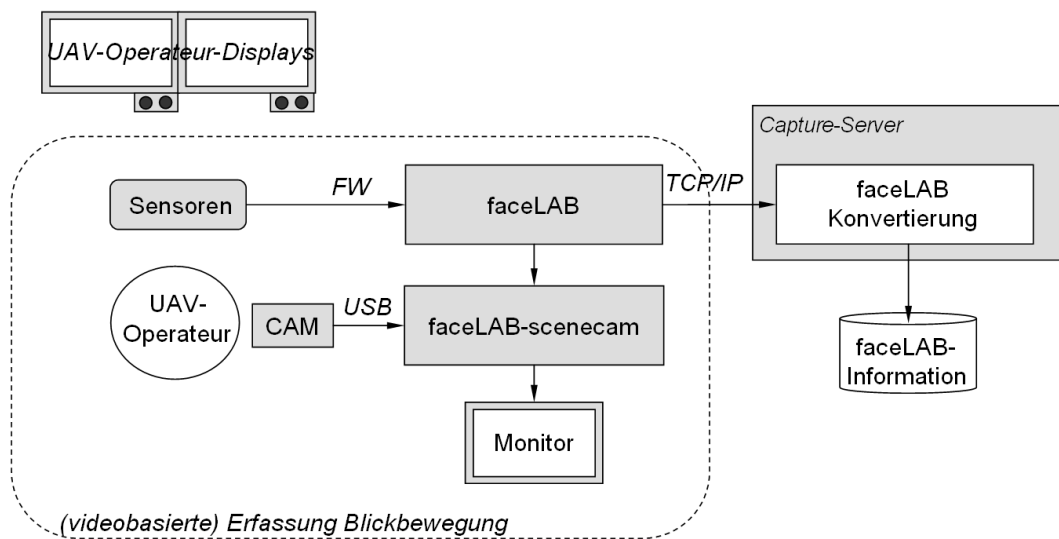


Abbildung 5.12: Messung der Operateurblickbewegungen

Segmentierung der Blickbewegung

Für eine Analyse des Blickverhaltens müssen in einem nachfolgenden Schritt die bereitgestellten Blickbewegungsdaten zunächst in Fixationen und Sakkaden segmentiert werden. Von Interesse sind dabei vordergründig die Fixationen, d.h. die Zeiten in den prinzipiell eine Wahrnehmung von Information erfolgen kann. Fixationen zeichnen sich durch räumliche und zeitliche Zusammenhänge aus [Goldberg und Kotval, 1999], so dass für eine Fixationserkennung eine Zuordnung von Blickpunkten zu Fixationsorten erfolgen muss.

Eine umfassende Evaluierung verschiedener räumlich-zeitlicher Fixationsalgorithmen bietet [Salvucci, 1999] und [Salvucci und Goldberg, 2000]. Hierbei zeichnet sich der „Dispersion Threshold (I-DT)-Algorithmus“ durch deutliche Vorteile in Genauigkeit, Robustheit, Geschwindigkeit und Umsetzung aus, so dass dieser für die Extraktion von Fixationen verwendet wurde. Beim I-DT handelt es sich um einen streuungsbasierten Algorithmus. Dieser geht von der Annahme aus, dass Fixationspunkte infolge ihrer geringen Geschwindigkeit dazu neigen nahe beieinander zu liegen. Folglich identifiziert der Algorithmus Fixationen als Gruppen aufeinander folgender Blickpunkte, die eine definierte Streuung nicht überschreiten. Als zeitlichen Aspekt sieht der I-DT eine Berücksichtigung einer Fixationsmindestdauer vor. Basis des I-DT stellt der Widdel-Algorithmus [Widdel, 1984] dar. Dieser arbeitet mit einem Abtastfenster mit dem aufeinander folgende Datenpunkte als potentielle Fixationen überprüft werden. Das Abtastfenster beginnt beim Start des Blickbewe-

gungsprotokolls und wird so lange um eine Position verschoben bis es eine bestimmte minimale Anzahl an Punkten enthält. Diese minimale Anzahl an Punkten ist definiert durch den zeitlichen unteren Schwellwert (minimale Fixationsdauer) und lässt sich aus der Abtastrate des Systems ermitteln. Ist diese erreicht, überprüft der I-DT im nächsten Schritt die Streuung dieser Punkte. Hierbei können prinzipiell unterschiedliche Streuungsmaße verwendet werden. Eine Übersicht über die Auswirkung verschiedener Streuungsmaße findet sich in [Blignaut, 2009].

Ist die Streuung kleiner als ein im Vorfeld definierter Schwellwert, wird die Fensterposition um einen Blickpunkt weiter verschoben, die Fixationsdauer erhöht sich damit. Überschreitet die Streuung hingegen den definierten Schwellwert wird die Fixation als Schwerpunkt der sich im Fenster befindliche Punkte ermittelt. Die Fixation erhält damit eine Ortskoordinate sowie eine Zeit, die sich aus der Anzahl der im Fenster befindlichen Punkte ermittelt. Die Anzahl der Punkte im Abtastfenster wird auf Null zurückgesetzt, die Fensterposition weiter verschoben, so lange bis wieder die erforderliche minimale Anzahl an Punkten erreicht wird.

Für den I-DT muss die minimale Fixationsdauer, sowie der Fixationsradius als Streuungsschwellwert festgelegt werden. Da für diese Werte keine eindeutig definierten Werte existieren, müssen diese Grenzwerte subjektiv in Anlehnung an statistische Erfahrungswerte festgelegt werden [Salvucci und Goldberg, 2000]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass beide Parameter voneinander abhängig sind und daher sehr sorgfältig gewählt werden sollten. [Blignaut, 2009] zeigt hierzu Untersuchung zu Ermittlung optimaler Schwellwerte.

5.1.3.2 Erfassung manueller Interaktionen

Zusätzlich zu den Blickbewegungen werden die manuellen Interaktionen der Versuchspersonen mit dem UAV-Arbeitsplatz (vgl. Kapitel 5.1.3.2) erfasst. Diese lassen sich unterteilen in Interaktionen mit den Bedientöpfen (*Button Interaktionen*), den Drehschaltern (*Rotary Interaktionen*), sowie in Interaktionen mit der Karte (*Map Interaktionen*). Tabelle 5.3 gibt hierzu eine Übersicht über die Detailinteraktionen in den unterschiedlichen Kategorien.

BUTTON INTERAKTION	ROTARY INTERAKTION	MAP INTERAKTION
<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsartenauswahl (<i>FMS/CAM/RECCE</i>) • Funktionsanwahl (z.B. <i>SEL-TARGET</i>, <i>MAP-GND</i>, <i>ADD-OBJ</i>) • Kartenmodeselektion (z.B. <i>UAV</i>, <i>NUP/TRK/ROSE</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zoomänderung • Anpassung Bildhelligkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Objektanwahl • Objekt positionierung • Kartenverschiebung • Objektzentrierung

Tabelle 5.3: Manuelle Displayinteraktionen

Die für die Erfassung realisierte Hard- und Software Umgebung ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Die relevanten Bediengeräte sind dabei die Touchdisplays sowie die unterhalb der Displays angeordneten Drehgeber.

- *Button/Map-Interaktionen*: Der UAV-Operateurarbeitsplatz besteht aus zwei 12 Zoll kapazitiven Touchdisplays, auf den jeweils ein Multi-Funktionsdisplay dargestellt wird. Die Berührung der Bildschirmoberfläche wird über einen integrierten Controller in den Displays in eine

Touchposition (Mouseposition) umwandelt. Damit ausgelöste Eventfunktionen (click, mouse move) werden neben den Positionsinformationen an das MHDD Moding weitergeleitet, das diese Information entsprechend weiterverarbeitet.

- *Rotary Encoder (Drehgeber)* - Die Drehgeber sind an einen Mikrocontroller (Atmega16) angebunden, der das von den Drehgebern empfangene Signal über die serielle Schnittstelle (UART) an einen embedded Ethernet Geräteserver ((Lantronix)XPort) schickt. Dieser ermöglicht die Weiterleitung der Drehgeberdaten über TCP/IP. Der Prozess RotEncoderToQueue empfängt diese Daten und konvertiert sie in ein entsprechendes Datenformat, um es über eine Interprozesskommunikation (Mico-Corba) nachfolgenden Prozessen zur Verfügung zu stellen.

Der Prozess „Manual Operator Interactions“ fusioniert diese beiden Informationsquellen und stellt eine Beschreibung der manuellen Interaktionen über Interprozesskommunikation nachgeschalteten Prozessen zur Verfügung.

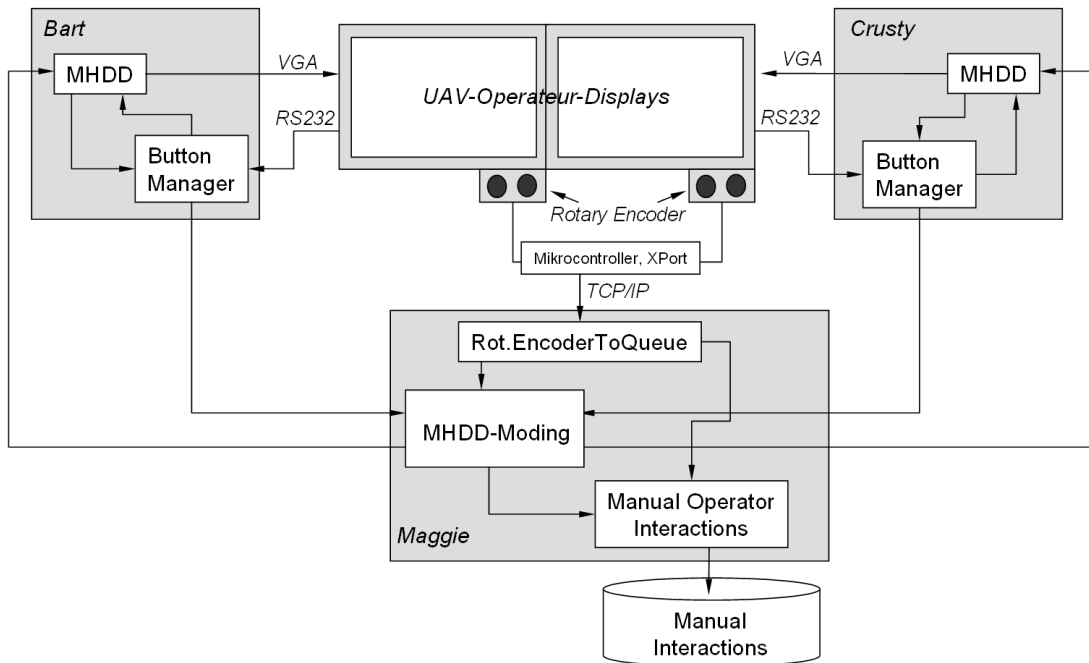


Abbildung 5.13: Erfassung manueller Interaktionen des UAV-Operators

5.1.3.3 Videobasierte Erfassung der Interaktionen

Die videobasierte Erfassung sieht die Aufzeichnung der duplizierten UAV-Operateurdisplays (MHDD4/3 Clone) überlagert mit den von der Versuchsperson getätigten manuellen und visuellen Interaktionen (interaction overlay) vor. Abbildung 5.14 visualisiert die Überlagerung von Interaktionsdaten mit dem aktuellen Situationskontext. Die grünen Kreuze markieren dabei die Blickpositionen des Operators, während rote Punkte bzw. Striche die manuellen Interaktionen des Operators aufzeigen. Um nicht nur die instantanen Interaktionen sondern zudem ihren Verlauf beobachten zu können werden die Interaktionsdaten für einen zurückliegenden Zeitraum von einer Sekunde visualisiert.

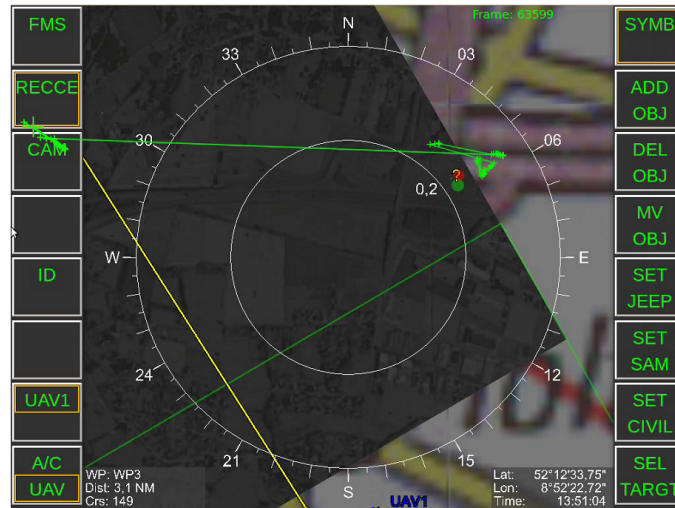


Abbildung 5.14: Videobasierte Erfassung von Operateurinteraktionen (grün - ungefilterte Blickdaten des Operators, rot - manuelle Interaktionen des Operators)

Diese fusionierte Erfassung stellt insbesondere für retrospektive Verhaltensanalysen ein unverzichtbares Instrumentarium dar [Flemisch, 2000], um sowohl Blickbewegungen, wie auch manuelle Interaktionen in dem damit verbundenen Informations-, Situations- und Aufgabenkontext zu analysieren. Die dafür notwendige Aufzeichnung von Situationskontext und Operateurverhalten erfolgt durch Verwendung einer Screengrabber-Software. Sie ermöglicht durch kontinuierliche Erstellung von Screenshots, Interaktionsverhalten und Situation in einem Videostream zu fusionieren. (vgl. Abbildung 5.15).

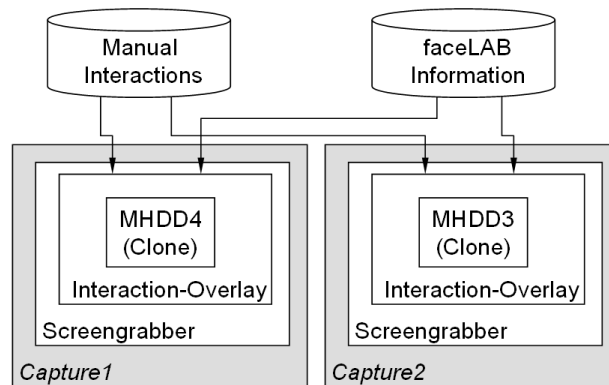


Abbildung 5.15: Videobasierte Erfassung der Operateurinteraktionen

5.1.3.4 Erfassung des Situationskontextes

In Hinblick auf eine Leistungsbewertung ist die vollständige taktische Lage im Sinne eines *God's Eye View* zu erfassen. Diese enthält neben den auf den Cockpitdisplays visualisierten Informationen die Positionen aller in der Mission vorkommenden taktischen Elemente, wie z.B. die der Indikatoraufgabe zugrunde liegenden freundlichen und feindlichen Objekte oder auch die SAM-Stellungen einschließlich ihrer zugehörigen Bedrohungsradien bzw. Sensorerfassungsradien. Diese

taktische Lage dient als Referenz für die Bewertung der Leistung im Hinblick auf nicht detektierte oder falsch klassifizierte Objekte.

Neben der Leistungsevaluierung werden die taktischen Lagedaten für die retrospektive Semantikzuordnung (Abschnitt 5.1.3.8) benötigt. In diesem Zusammenhang sind besonders die für den Operateur wahrnehmbaren Informationen zu protokollieren. Sie lassen sich entnehmen aus:

- der aktuellen Konfiguration der Multifunktionsdisplays zur UAV-Führung (d.h. aktueller Betriebsmode, modeabhängige Buttonbezeichnungen, vorgenommene Zoomeinstellungen) und
- der in den Displays dargestellten Informationen (d.h. taktische Elemente, Bedrohungen, Start-/Landeplätze, Korridore, FLET/FLOT-Verläufe, Routenverläufe, Wegpunkte, aufzuklärende Gebäude, Hubschrauber- und UAV-Positionen).

Abbildung 5.16 zeigt die hierzu implementierte Instrumentierung des Simulators. Jede dieser Display- und Situationskontextinformationen wird in separaten Logfiles mit einem Zeitstempel der Simulationszeit, wie auch des Blickbewegungssystems versehen, um rückwirkend eine eindeutige Zuordnung zwischen Interaktionen und Situationskontext gewährleisten zu können.

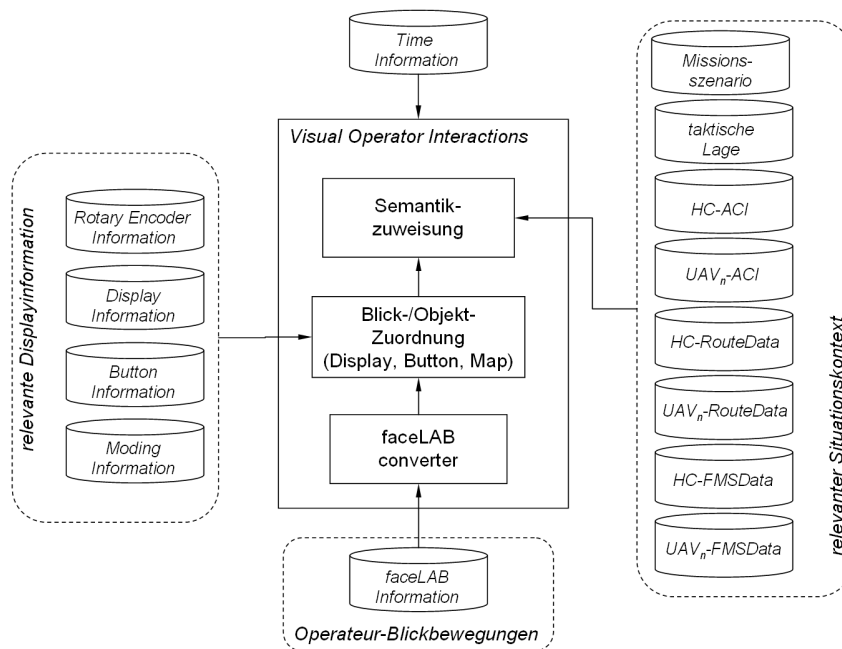


Abbildung 5.16: Erfassung des Situationskontextes

5.1.3.5 Diskrete Erfassung der Beanspruchung

Während der Experimente wird zudem in diskreten Intervallen die subjektive Beanspruchung der Versuchspersonen unter Verwendung des NASA-TLX Verfahrens (*NASA Task Load Index*) [Hart und Staveland, 1988] erfasst. Ziel ist es damit das subjektive Beanspruchungsempfinden bezogen auf die durchgeführte Belastungssteigerung zu dokumentieren. Über den gesamten Missionsverlauf verteilt wurden hierbei insgesamt sechs mal die entsprechenden Fragebögen vorgelegt. Diese waren wie folgt über die einzelnen Missionsabschnitte verteilt:

- Drei NASA-TLX Bewertungen entlang der Hinflugroute (Ingress) - zeitlicher Abstand ca. 6 Minuten, jeweils nach einer Ansammlung von Objektidentifizierungsaufgaben, die für sich abgeschlossen waren.
- Eine NASA-TLX Bewertung im Einsatzgebiet (HOA), unmittelbar nach erfolgter Umplanung auf eine Ausweichlandezone.
- Zwei NASA-TLX Bewertungen entlang der Rückflugroute (Egress) - jeweils nach Beendigung einer bzw. mehrfacher SAM-Lokalisierungsaufgabe(n).

Bei dem NASA-TLX-Verfahren handelt es sich um ein subjektives, mehrdimensionales Verfahren, das häufig für die Beurteilung der mentalen Beanspruchung von Piloten eingesetzt wird [Schlick u. a., 2010]. Dieses Verfahren bietet den Versuchspersonen die Möglichkeit für eine retrospektive Situation seine empfundene Beanspruchung zu bewerten.

„Resultat des Verfahrens ist ein Beanspruchungsmaß, das sich aus der gewichteten Bewertung von sechs Teilskalen: *Geistige Anforderung*, *Körperliche Anforderung*, *Zeitliche Anforderung*, *Aufgabenerfüllung*, *Anstrengung* und *Frustration* ergibt“ [Schlick u. a., 2010].

Das Beanspruchungsmaß bietet dabei nicht nur eine Aussage über die Intensität der subjektiv empfundenen Beanspruchung, sondern zusätzlich diagnostische Informationen über die daran beteiligten Komponenten hinsichtlich der sechs Teilskalen.

5.1.3.6 Erfassung der Leistung

Um Änderungen im Operateurverhalten infolge selbstadaptiver Strategien von deutlichen Überforderungssituationen und damit verbundenen Verhaltensänderungen abzugrenzen, wird die Leistung der Versuchspersonen erfasst. Dies erfolgt über klassische Leistungsmaße (Abweichungen, Zeiten, Fehler) bezogen auf die hier betrachtete Indikatoraufgabe. Tabelle 5.4 fasst hierzu die erfassten Performanzparameter zusammen.

ABWEICHUNGEN	BESCHREIBUNG
Anzahl klassifizierter Objekte	(prozentuale) Anzahl, der erfolgreich klassifizierten Objekte je Missionssegment (z.B.: <i>Ingress</i> , <i>HOA</i> , <i>Egress</i>)
Objektidentifizierungszeiten	Zeitspanne vom Erkennen eines Objektes (erste visuelle Aufmerksamkeitszuwendung) bis zum Eintragen des Klassifikationsergebnisses in das System.
FEHLER IN DER AUFGABENBEARBEITUNG	
Klassifikationsabbruch	Abbruch einer bereits begonnenen Objektidentifizierungsaufgabe. Der Abbruch kann dabei im <i>RECCE-Mode</i> , nach dem Markieren eines Objektes, im <i>CAM-Mode</i> während des Identifizierungsvorganges oder aber während des Eintragens des Klassifikationsergebnisses (<i>RECCE-Mode</i>) erfolgen.
Falsche Klassifikation	Hierbei wird ein aufzuklärendes Objekt falsch identifiziert und folglich falsch in das System eingetragen.
Systembedienfehler	Systembedienfehler umfassen zwei Arten von Bedienfehlern: (1) Kurzfristige fehlerhafte Bedienaktion des Operators, die jedoch unmittelbar durch eine erneute Aktion korrigiert wird. (2) Eine wiederholte Fehlbedienung, verursacht durch ein Unverständnis des Operators bezüglich der zugrunde liegenden Funktionalität. In diesem Fall führt der Operator eine Fehlbedienung infolge mangelnden Wissens wiederholt falsch aus.
Vergessen einer „ <i>completion task</i> “	Vergessen, die UAV-Kamera nach erfolgter Identifizierung wieder in den MAP-GND-Mode zustellen, um weiterhin Bodenbilder des UAVs zu erhalten.

Tabelle 5.4: Erfasste Leistungsparameter

Die Erfassung der Operateurleistung erfolgt dabei durch eine Aufzeichnung entsprechender Datensätze. Diese umfassen neben den manuellen und visuellen Operateurinteraktionen auch den Situationskontext.

5.1.3.7 Sonstige Experimentelle Datenerhebung

Neben den offensichtlichen Parametern wie Beanspruchung, Leistung und Verhalten werden ferner die Cockpitkommunikation und das Situationsbewusstsein der Operateure aufgezeichnet. Sie sollen lediglich als weitere Indikatoren für kritische Beanspruchungsbedingung im Rahmen retrospektiver Verhaltensanalysen herangezogen werden.

Cockpitkommunikation

Die Audio-Aufzeichnung erfolgt über ein im Cockpit installiertes Sound-System. Hierfür sind die einzelnen Head-Sets der beteiligten Personen (z.B. Kommandant, Pilot, Air Mission Commander, Versuchsleiter) mit einem Soundserver verbunden. Über eine Bedienoberfläche (Mixer-Control) werden die für die Audio-Mitschnitte ausgewählten Kanäle (z.B. die des Kommandanten, Piloten und Air Mission Commanders) definiert, sowie die Ein- und Ausgangskanäle des Soundservers konfiguriert. Die Spracheingabe zur erweiterten Systembedienung ist über eine kommerzielle sprecherunabhängige Verbundworterkennung von Nuance-VoCon realisiert. Die Sprachausgabe von Systemmeldungen erfolgt über die Software AT&T Natural Voices, die aus maschinen lesbarem Text entsprechende akustische Signale generiert. Abbildung 5.17 bildet hierfür den entsprechenden Hard- und Softwareaufbau ab.

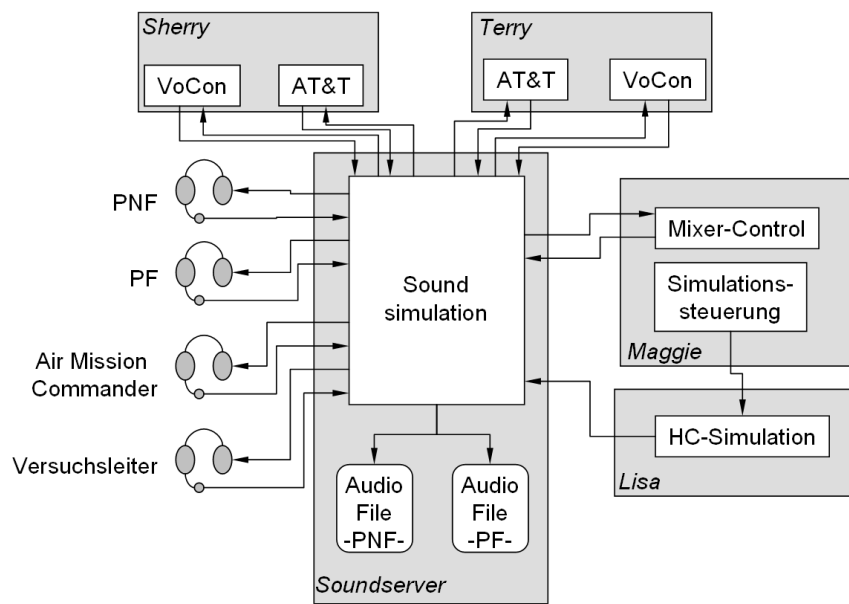


Abbildung 5.17: Hard- und Softwarekomponenten für die Erfassung der Cockpitkommunikation

Erfassung des Situationsbewusstseins des Operateurs

Das Situationsbewusstsein ist nach [Endsley, 1998] definiert als:

„The perception of the element in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning and the projection of their status in the near future.“

Es stellt die Grundlage für das Treffen von richtigen Entscheidungen dar. Insbesondere in komplexen, dynamischen Systemen, wie der Multi-UAV-Führung, kann das Situationsbewusstsein des Operateurs infolge der Vielzahl an aufzunehmender und zu verarbeitender Information bei nur limitiert zur Verfügung stehenden Aufmerksamkeitsressourcen eingeschränkt sein, und somit eine potentielle Fehlerquelle darstellen.

Nach [Endsley, 2000b] [Endsley, 2000a] erstreckt sich das Situationsbewusstsein über drei Ebenen. Diese umfassen die Wahrnehmung der Situation (*Level 1 SA*), gefolgt von der Interpretation dieser Situation ggf. unter Berücksichtigung eigener Ziele (*Level 2 SA*) und schließlich der Fähigkeit zukünftige Situationsereignisse sowie deren Auswirkungen vorherzusehen (*Level 3 SA*).

Um das individuelle, subjektive Situationsbewusstsein von Versuchspersonen zu erfassen, existieren unterschiedliche Herangehensweisen. So werden beispielsweise introspektive Fragebögen zum aktuellen Situationsbild vorgelegt (*SART - Situation Awareness Rating Technique*) [Endsley, 1998]. Die Wesentliche Einschränkung dieser Methode stellt hierbei die Unfähigkeit der Versuchspersonen dar, ihr eigenes Situationsbewusstsein, insbesondere im Hinblick auf fehlendes Wissen, zu formulieren [Endsley, 1995].

Um diesem nachteiligen Effekt entgegen zu wirken, bietet sich die objektive Erfassung des Situationsbewusstseins mit Hilfe des *SAGAT* Tests (*Situation Awareness Global Assessment Technique*) an. Hierbei wird in gezielten, jedoch für die Versuchsperson möglichst nicht vorhersehbaren Abständen die Simulation angehalten, die Displays der Simulation ausgeblendet und der Versuchsperson verschiedene Fragen zur aktuell vorherrschenden Situation gestellt. Der kritische Vorgehensschritt dieser Methode liegt in der Ermittlung relevanter Situationsmerkmale, die die Aufgabensituation treffend charakterisieren [Endsley, 2000b]. Diese können im Vorfeld auf Basis kognitiver Aufgabenanalysen ermittelt werden.

Für die Erfassung des Situationsbewusstseins wird im Rahmen der Experimente ein SAGAT-ähnlicher Test gewählt, der durch den Versuchsleiter über die Simulationssteuerung zu definierten Zeitpunkten aktiviert wird (vgl. Abbildung 5.18).

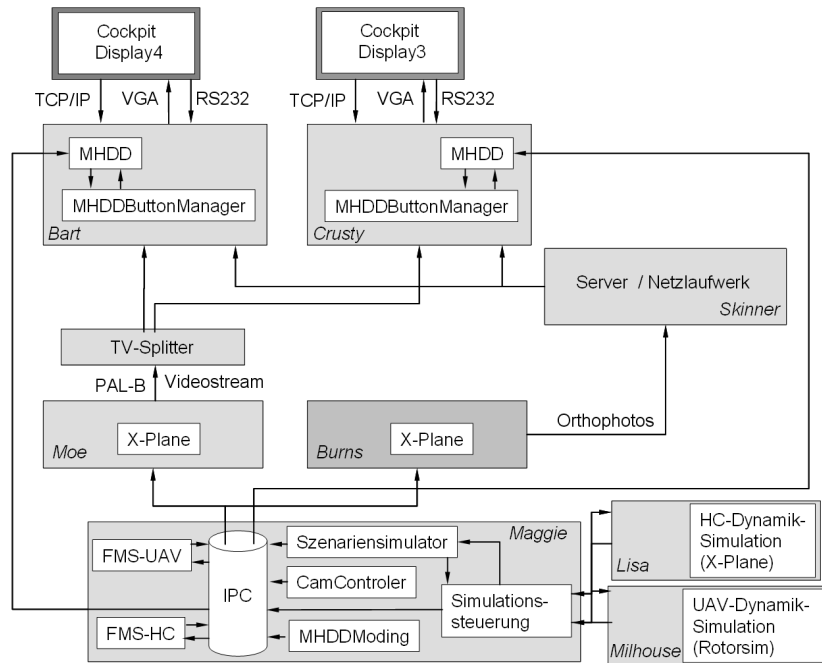


Abbildung 5.18: Hard- und Softwarekomponenten für die Erfassung des Situationsbewusstseins

Mit den Einleiten des *SAGAT*-Tests wird die auf den Displays dargestellte taktische Lage gespeichert, und gleichzeitig eine neue, reduzierte taktische Lage, bestehend aus FLET/FLOT-Verlauf, Homepage, Landing Sites, Korridore und HC-Route, über das MHDD-Moding für das Display4 eingespielt. Display3, ebenso wie die restlichen Displays im Cockpit werden parallel vollständig ausgeblendet (vgl. Abbildung 5.19). Die Versuchsperson wird aufgefordert, relevante Situationsmerkmale in das dafür vorgesehene Display mit der reduzierten taktischen Lage einzutragen (Abbildung 5.19). Als relevante Merkmale zur Überprüfung des Situationsbewusstsein in der Multi-UAV-Führung wurden die Position des eigenen Hubschraubers, die Position und ID der UAVs, die Position und Kategorie (freundlich/feindlich) relevanter Objekte zwischen Hubschrauber und UAVs, sowie der aktuelle Status der UAVs (funktionsfähig/abgeschossen) gewählt. Mit Beendigung des Tests werden die von den Versuchspersonen eingetragenen Elemente gespeichert, und die ursprüngliche taktische Lage für den Operateur wieder eingespielt.

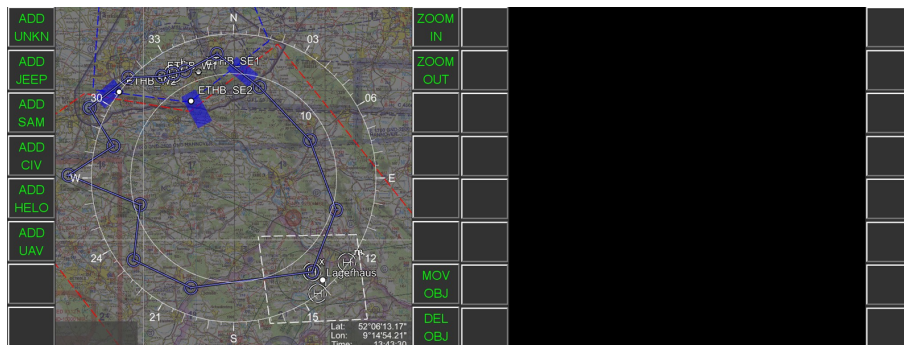


Abbildung 5.19: SAGAT Displaykonfiguration

5.1.3.8 Semantische Zuordnung

Die Verwendung von Multifunktionsdisplays im Arbeitsplatz des UAV-Operators führt dazu, dass sich sowohl die dargestellte Information (z.B. Route, Korridore, Gebäude, Wegpunkte, UAVs, HC) als auch die verfügbaren Funktionen der Bedienoberfläche in Abhängigkeit von vorgenommenen Einstellungen ändern. So variiert die Information bzw. Funktionalität in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren.

- *Aktuell gewählter Displaymode (FMS-/RECCE-/CAM-Mode)*
Mit dem gewählten Displaymode ändern sich sowohl die Buttonfunktionalitäten, einschließlich der Buttonbezeichnung, als auch die auf der Displayfläche dargestellte Information.
- *Aktuell durch den Operateur gewählte Zoomstufe*
Sie limitiert den sichtbaren Kartenausschnitt und damit die Sichtbarkeit verschiedener Objekte im aktuell gewählten Mode.
- *aktuell selektierter Mode (UAV/SLEW-Mode)*
Dieser Faktor bezieht sich hier auf Dynamik der sichtbaren, dynamisch veränderlichen Information. So wird im UAV-Mode der aktuell dargestellte Kartenausschnitt in Abhängigkeit von der Position des gegenwärtig selektierten UAVs verschoben, während im SLEW-Mode eine Verschiebung des Kartenausschnittes und damit der verfügbaren, dargestellten Information durch den Operateur veranlasst wird.

Vor dem Hintergrund dieser sich ständig ändernden Information ist daher eine Betrachtung der Operateurinteraktionen auf Basis von Ortskoordinaten wenig sinnvoll. Für die Analyse von Operateurverhalten muss folglich eine informationsbezogene Betrachtung der Interaktionen, d.h. eine semantische Zuordnung zwischen Interaktion und dahinter liegender Information stattfinden. Diese ist gleichermaßen für die manuellen wie auch visuellen Interaktionen der Versuchspersonen mit dem Operateurarbeitsplatz durchzuführen. Schematisch ist dieses Vorgehen in Abbildung 5.20 für die visuellen Interaktionen, und Abbildung 5.21 für die manuellen Interaktionen dargestellt.

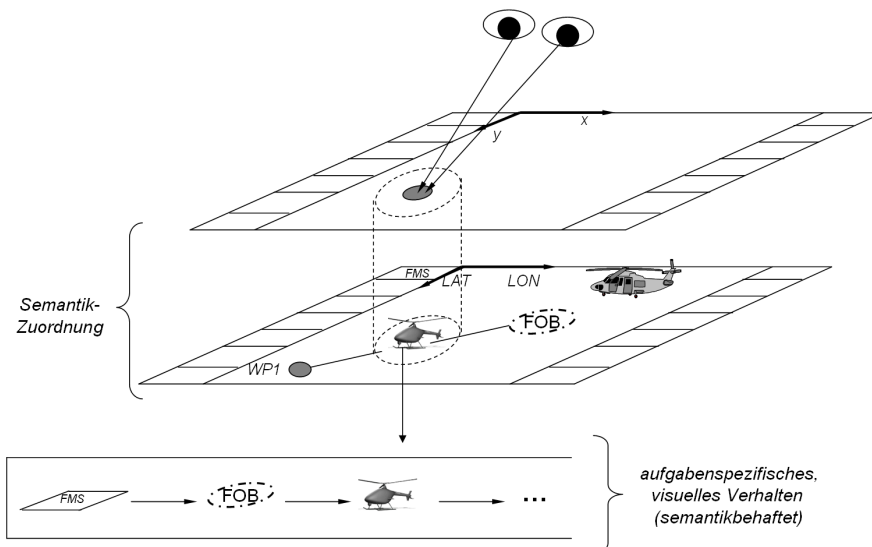


Abbildung 5.20: Prinzip semantischer Zuordnung visueller Interaktionen

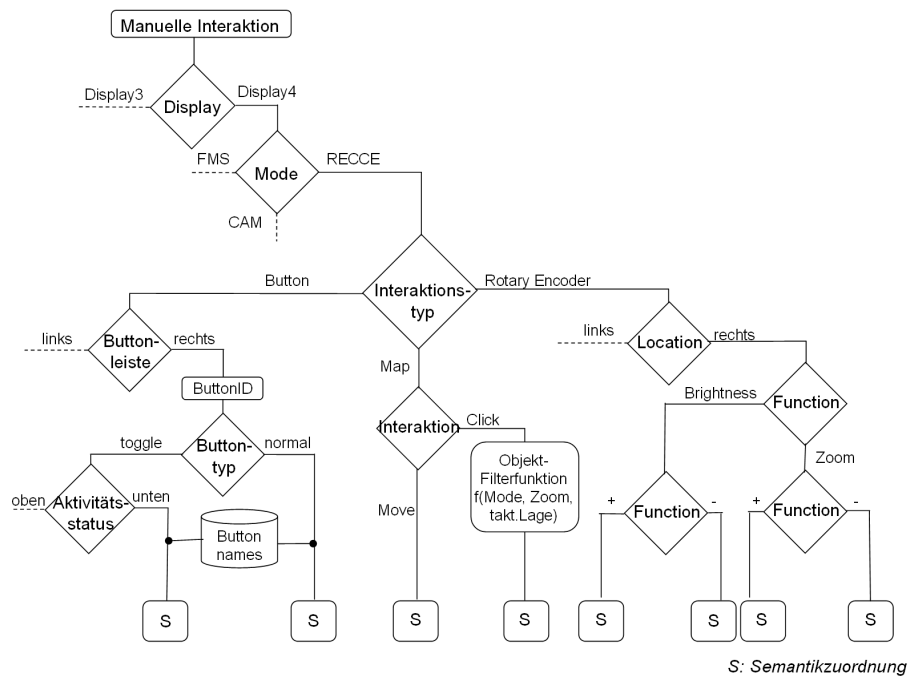


Abbildung 5.21: Vorgehen bei der semantischen Zuordnung manueller Interaktionen

Erst die semantische Betrachtung der Interaktionen ermöglicht es:

- Verhaltensmuster, Strategien in der Aufgabenbewältigung in einer sich ändernden Umgebung auf einer abstrakteren, symbolischen Ebene zu analysieren,
- korrelierende, wie auch abweichende Verhaltensmuster im Missionsgeschehen zu identifizieren,
- manuelle sowie visuelle Operateurinteraktionen auf Basis einer einheitlichen Semantik zusammenzuführen und damit das Gesamtverhalten des Operators analysieren, verstehen und bewerten zu können.

Für die Zuordnung der Semantik wurden ausschließlich missionsrelevante Information wie beispielsweise Landeplätze, FOB, Korridore, Lagerhaus, Landeplatzeinweiser, Objekte der taktischen Lage (Jeeps, SAM-Stellungen, zivile Objekte), Hubschrauber, sowie zu führende UAVs berücksichtigt (Abbildung 5.22). Nicht berücksichtigt wurden hingegen zusätzlich sichtbare Informationen der Karte wie Städte, Orte, Flüsse oder Straßen. Ferner ist anzumerken, dass diese Zuordnung für visuelle Interaktionen infolge der zum Teil nur sehr geringen Blickbewegungsqualität bzw. dem abschnittsweise vollständigen Verlust an Blickbewegungsdaten infolge Sensorlimitierungen nur bedingt möglich war.

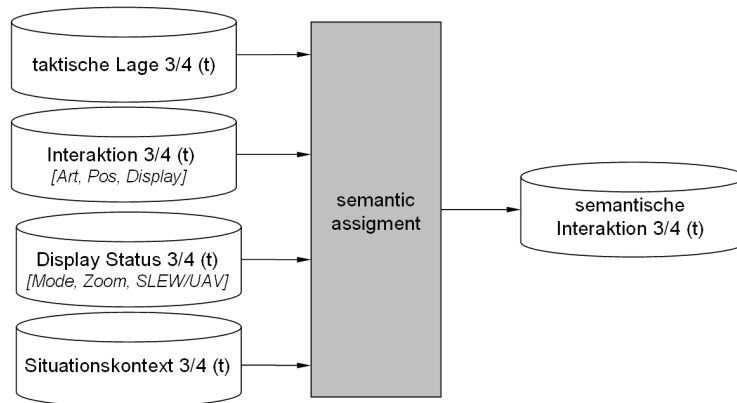


Abbildung 5.22: Semantische Zuordnung der Interaktionen

5.1.4 Versuchsumgebung

Für die Erfassung des Operateurverhaltens in dem in Abschnitt 5.1 beschriebenen Missionskontext bedarf es einer entsprechenden Versuchsumgebung. Diese soll insbesondere die Aufgabe der Multi-UAV-Führung möglichst realistisch abbilden. Entscheidend in diesem Zusammenhang ist der UAV-Operateurarbeitsplatz zur Führung der unbemannten Sensorplattformen. Dieser ist auf dem Arbeitsplatz des Kommandanten im Hubschrauber Simulator integriert. Des weiteren ist auch die Station des Versuchsleiters zur Beobachtung der Versuchspersonen essentiell für Verhaltensbeobachtung. Beide sollen im folgenden detailliert betrachtet werden.

5.1.5 Hubschrauber-Forschungsflugsimulator

Für die experimentelle Gewinnung von Verhaltensdaten wurde der generische, „fixed-based“ Hubschraubersimulator und Multi-UAV-Simulator des Instituts für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr München verwendet. Das dynamische Flugverhalten des Hubschraubers wurde unter Verwendung der Dynamiksimulation X-Plane mit dem darin integrierten Modell des Typs EC135 realisiert. Die Dynamik der UAVs hingegen wurde durch ein vereinfachtes Flugdynamikmodell für Rotorflügler (Rotorsim) [Vohla, 2010] generiert. Um den Eindruck einer Bewegung im Raum zu vermitteln und den manuellen Sichtflug zu ermöglichen, wurde der Simulator an eine Sichtsimsulationsanlage angebunden. Hierbei handelt es sich um eine Rückwandprojektionsanlage, die durch ihre drei Ebenen einen Sichtbereich von ca. 180° abdeckt. Die Außensichtsimulation wird ebenfalls mit X-Plane realisiert. Vorhandene Bodentexturen von X-Plane wurden um Luftbilder aus Google Earth (Auflösung ca. 60cm/Pixel) erweitert, um eine bessere Übereinstimmung mit Geländemerkmale gängiger ICAO-Karten zu erreichen und Sichtflugbedingungen (VFR) sowie geländenahen Tiefflug zu verbessern.

Das Cockpit des Hubschraubersimulators umfasst zwei Arbeitsplätze, den des Hubschrauberpiloten (rechts) und einen integrierten UAV-Operateurarbeitsplatz (links) (Abbildung 5.23). Für die Umsetzung erforderlicher Cockpitinstrumentierung und Informationsdarstellung wurde das Cockpit in der Philosophie von Glascockpits mit insgesamt fünf 12-Zoll-LCD-Multifunktions-Touchdisplays (1024×768 Pixel) ausgestattet.

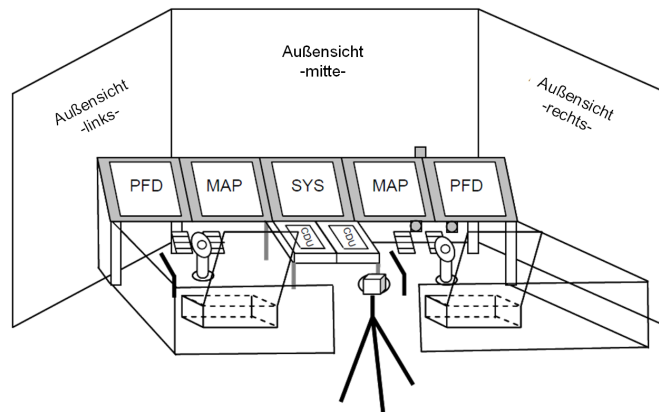


Abbildung 5.23: Schematischer Simulatoreaufbau

In der Versuchsdurchführung wurden als primäre Cockpitinstrumentierung des Piloten eine Flugführungsanzeige (PFD) (rechtes Pilotendisplay), eine Navigationskarte (MAP) (linkes Pilotendisplay), sowie ein Systemdisplay (SYS) für Radarwarnfunktionalitäten (mittig zwischen Kommandant und Pilot) gewählt. Die Flugführungsanzeige stellte die für den Hubschrauberpiloten wichtigsten Hubschrauberzustandsdaten wie Geschwindigkeit, Höhe, Steuerkurs und Lage des Hubschraubers im Raum zur Verfügung. Die Navigationskarte (MAP) enthält Informationen zur lateralen Steuerung des Hubschraubers wie Position, Route, Kurs und Distanz zum nächsten Wegpunkt, sowie die gegenwärtige Missionszeit.

Auf dem mittleren Display (SYS) befand sich für die Experimente ein Radar- und „Missile Warner“, der sowohl dem Piloten, als auch dem Kommandanten, Informationen über eine feindliche Erfassung des Hubschraubers durch ein Radar oder einen sich annähernden Flugkörper anzeigt.

5.1.6 UAV-Operateurarbeitsplatz

Der UAV-Operateurarbeitsplatz (Abbildung 5.24) ist in den Arbeitsplatz des Kommandanten im Cockpit integriert. Dieser umfasst zwei der fünf Multifunktions-Touch-Displays. Jedes dieser Displays kann von der Versuchsperson individuell mit drei unterschiedlichen Formaten, *FMS*-, *RECCE*-, *CAM-Mode* konfiguriert werden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihres Informationsgehaltes und der Funktionalität.



Abbildung 5.24: UAV-Operateurarbeitsplatz

FUNKTIONALITÄTEN

FMS-Mode (Abbildung 5.25, links): Der FMS-Mode ermöglicht es dem Operateur bestehende Routen des Hubschraubers, wie auch der UAVs zu modifizieren und sofern erforderlich an die aktuelle Situation durch Einsetzen (INS RP), Verschieben (MOVE WP) und Löschen von Routenwegpunkten und Loiterwegpunkten anzupassen (LOITR AT).

RECCE-Mode (Abbildung 5.25, rechts): Dieser Mode bietet dem Operateur in erster Linie Funktionalitäten für die Umsetzung der Aufklärungsaufgabe. Sie umfassen:

- Das Detektieren von bisher unaufgeklärten Objekten, dargestellt als Hotspots in den Bodenkachelbildern. Diese können mit einem Fragezeichen als noch zu identifizierende Objekte referenziert werden (ADD OBJ).
- Das Ausrichten der UAV-Kamera des aktuell selektierten UAVs auf einen Hotspot oder ein bereits durch ein Fragezeichen markiertes Objekt (SEL TARGT).
- Die Klassifizierung der Objekte als freundlich bzw. feindlich (SET JEEP, SET SAM, SET CIVIL).

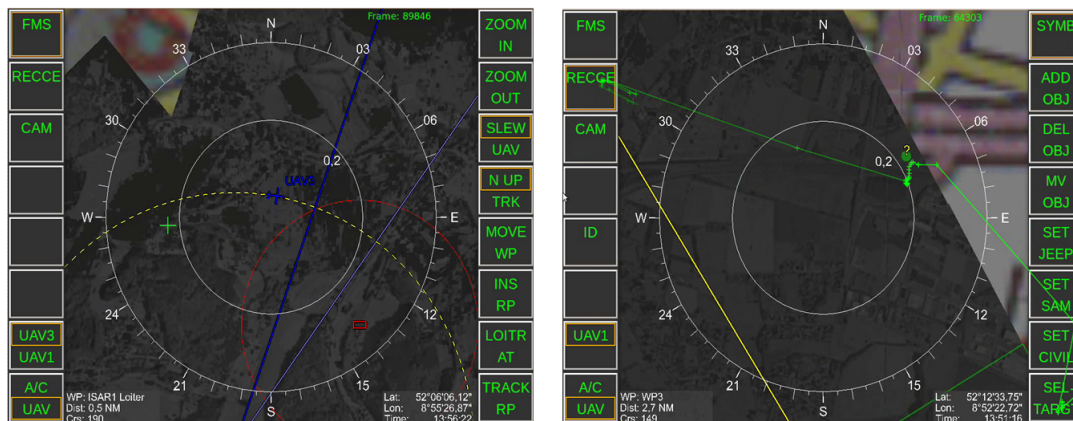


Abbildung 5.25: Displayformate: FMS-Mode (links), RECCE-Mode (rechts)

CAM-Mode: Der CAM-Mode ermöglicht dem UAV-Operateur die Identifikation und Klassifikation des entdeckten Objekts. Hierfür steht dem Kommandanten ein simulierter Infrarot-Live-Videostream zur Verfügung, der automatisiert auf ein zuvor selektiertes Objekt ausgerichtet werden kann (TRACK TARGT, Abbildung 5.26).

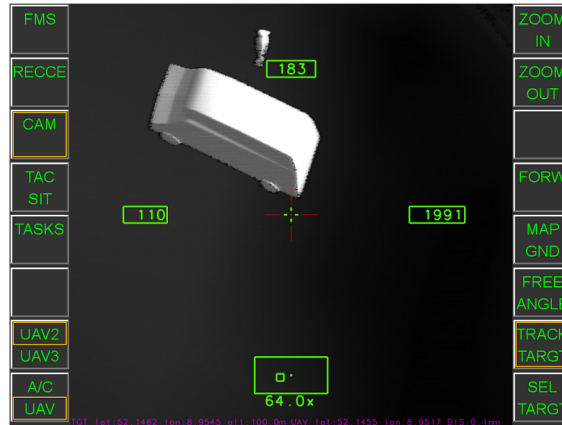


Abbildung 5.26: Displayformat: CAM-Mode

INFORMATIONSGEHALT

Der FMS- und RECCE-Mode bietet aufbauend auf einem wahlweise drehbaren NorthUP/HeadingUP und verschiebbaren Kartendisplay (Maßstab 1:250000, überwiegend verschiedene missionsspezifische und taktische Informationen. Diese umfassen:

- Kursrose und aktuelle Zoomstufe,
- HC und UAV-Positionen,
- Wegpunkt- und Routeninformationen von HC und UAVs,
- Missionsrelevante Informationen wie beispielsweise Forward Operating Base (FOB), Abgrenzung des eigenen (freundlichen) und feindlichen Gebiets (FLOT-FLET-Verlauf), Ein-/Ausflugskorridore, Lande- und Ausweichlandeplätze, Operationsgebiet (HOA), sowie aufzuklärende Objektpositionen.

Diese Informationen werden durch die entsprechenden Dynamiksimulationen von Hubschrauber und UAVs, den Prozessen für die wegpunktbasierte Flugführung (FMS-HC/ FMS-UAV), sowie durch die Szenariensimulation bereitgestellt (vgl. Abbildung 5.27).

Sowohl im FMS- als auch RECCE-Mode wird die Kartendarstellung mit den durch die UAVs aufgenommenen Bodenbildern überlagert. Die systeminterne Aufnahme und Ablage der Bodenbilder auf einem Netzlaufwerk erfolgt durch den CamController.

Unter Berücksichtigung der aktuellen UAV-Kameraposition und ihrer Ausrichtung wird unter Verwendung von X-Plane ein texturiertes Landschaftsbild generiert, das als analoges Signal am Ausgang der Grafikkarte (PAL-B/G) bereit gestellt wird und mittels eines TV-Splitters, beiden MHDD-Prozessen (Bart, Crusty) (Abbildung 5.27) für die Darstellung auf den Operateur-Displays zugeleitet und im CAM-Mode angezeigt.

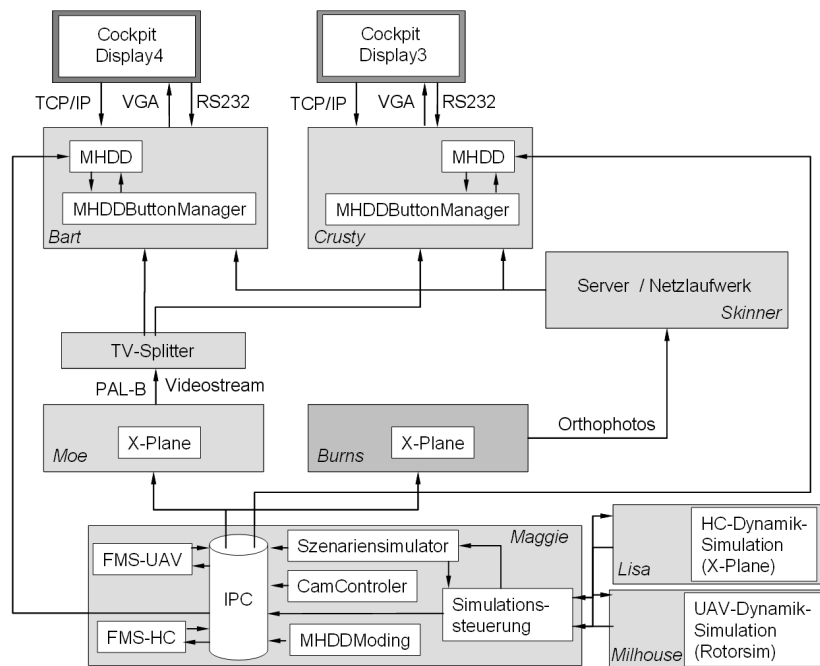


Abbildung 5.27: UAV-Operator-Displays: Hardware und relevante Softwaremodule

5.1.7 Operateurbeobachtungsstation

Eine weitere Komponente im Rahmen der Versuchsumgebung stellt die Operateurbeobachtungsstation dar (Abbildung 5.28). Sie dient sowohl der gezielten Überwachung der Blickbewegungsmessung (Abbildung 5.28, obere Displays) als auch des vom Operateur gezeigten Verhaltens im aktuellen Situationskontext (Abbildung 5.28, untere Displays).



Abbildung 5.28: Überwachungsdisplays der Operateurbeobachtungsstation (Displays: oben: Blickbewegungsüberwachung (*faceLAB*), unten: Operateurverhalten)

Für die Überwachung des im Situationskontext gezeigten Operateurverhaltens wurden die Displays des UAV-Operators dupliziert und mit aktuell vom Operateur durchgeführten manuellen und visuellen Interaktionen überlagert (vgl. Abbildung 5.29). Hierbei wurden die manuellen Interaktionen des Operators als rote Punkte (Betätigung eines Funktionsknopfes oder Anwählen eines Objektes) bzw. rote Striche (manuelles Verschieben der Karte) in dem duplizierten Display dargestellt, während die visuellen Interaktionen (Blickdurchtrittspunkte des Operators auf den Displays) in grün visualisiert wurden.

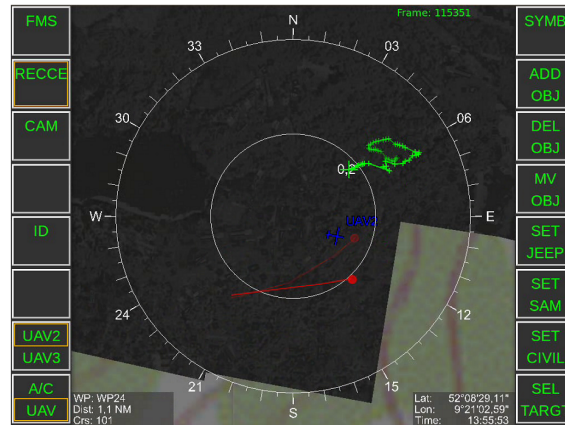


Abbildung 5.29: Dupliziertes UAV-Operateurdisplay überlagert mit den aktuellen manuellen (rot) und visuellen (grün) Interaktionen des Operators

Vordergründig in der Überwachung des Blickbewegungssystems ist die kontinuierliche Kontrolle des aktuellen Augenbildes der Versuchspersonen sowie die videobasierte Erkennung der Versuchsperson durch das System anhand seiner charakteristischen Merkmale (Features), dargestellt auf dem faceLAB1-Display. Das faceLAB-Display2 bildet ergänzend die aktuellen Kopf- und Blickvektoren des Operators in Bezug auf die Displays des UAV-Operateurarbeitsplatzes ab.

Wurde während der Versuchsdurchführung eine Verschlechterung der Erkennungsleistung des Operators durch das System erkannt, beispielsweise hervorgerufen durch Verdeckung des zur Messung notwendigen Purkinje-Reflexes durch die Augenlider des Operators oder durch das Verlassen des Sensorerfassungsbereiches infolge deutlicher Kopf- oder Körperbewegungen des Operators, erhielt die Versuchsperson unmittelbar, über ein mit dem Cockpit-Intercom verbundenes Headset, entsprechende Korrekturhinweise durch den Versuchsleiter.

Ergänzt wird die Operateurbeobachtungsstation durch die Darstellung und Aufzeichnung des von faceLAB-scene fusionierten Szenenkamerabildes. Hierbei handelt es sich um eine auf die UAV-Operateurdisplays ausgerichtete USB-Kamera der Firma Videology (640×480, 30 Hz), das mit einer Weitwinkel-Linse versehen ist, um den gesamten Displaybereich abdecken zu können. Dieses von der Kamera bereitgestellte Videobild wurde mit dem von faceLAB ermittelten Blick-/bzw. Kopfvektor überlagert und in faceLAB-scene zu einem gemeinsamen Videostream fusioniert. Dieser wurde über ein Display visualisiert, um so die gegenwärtige Aufmerksamkeitszuwendung des Operators im dreidimensionalen Raum verfolgen zu können.

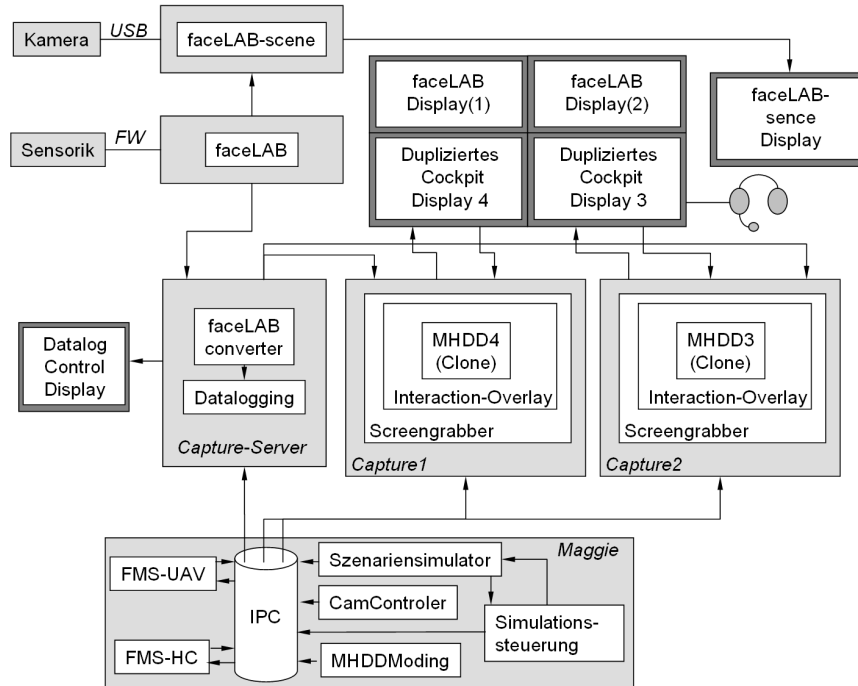


Abbildung 5.30: Hard- und Softwaremodule der Operateurbeobachtungsstation

5.1.8 Gesamtsystem

Abbildung 5.31 zeigt den in den Experimentalkampagnen verwendeten Gesamtsystemaufbau. Das zentrale Element stellt dabei das Hubschraubercockpit dar, repräsentiert durch den Kommandanten- und Pilotenarbeitsplatz. Dieses befindet sich eingebettet in die drei Außensichtdarstellungen, bereitgestellt durch (visual 1-3). Demgegenüber befinden sich die Operateurbeobachtungsstation zur Überwachung des UAV-Operateurverhaltens und die Simulationssteuerung. Die Simulationssteuerung dient in erster Linie zur Überwachung und Steuerung des Simulators, sowie für die Simulation missionsrelevanter Kommunikation der Beatzung mit dem AMC (Air Mission Commander) und ATC (Air Traffic Controller). Die Kommunikation im Cockpit, sowie zwischen Cockpit und Operateurbeobachtungsstation, als auch zwischen Cockpit und Simulationssteuerung (AMC/ATC) erfolgt ausschließlich über Headsets, die über den Audioserver verbunden sind.

Die für die Experimentalkampagne verwendete Rechnerumgebung ist in Abbildung 5.32 dargestellt. Sie umfasst insgesamt 24 PCs, die mit unterschiedlichen Betriebssystemen (Windows, Suse, Ubuntu) konfiguriert sind. Details zu Betriebssystemen, Prozessoren und Arbeitsspeichergröße können der Abbildung 5.32 entnommen werden. Die Rechner sind über zwei 48 Port Switches mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von je 1 GBit verbunden.

Die Displayrechner des Operateurarbeitsplatzes wurden durch *Bart* und *Crusty* realisiert. Szenariensimulation, Simulationssteuerung (Termio) und Interprozesskommunikation waren *Maggie* zugeordnet. UAV-Dynamik-Simulationen, Bodenkachel-Fotos und Infrarot-Videostreams wurden durch die Rechner *Milhouse*, *Burns* und *Moe* bereitgestellt. Die Dynamiksimulation des HC erfolgte durch *Lisa*, die Operateurblickbewegungserfassung durch *faceLAB* und die Aufzeichnung der Interaktionsvideos, getrennt für jeden Arbeitsplatzmonitor, auf *Capture 1* und *Capture 2*. Der *Capture-Server* diente zum Loggen der Simulationsumgebung (Szenariensimulation, HC/UAV-Simulation), sowie der für den UAV-Operateur dargestellten Information, einschließlich seiner manuellen und visuellen Interaktionen.

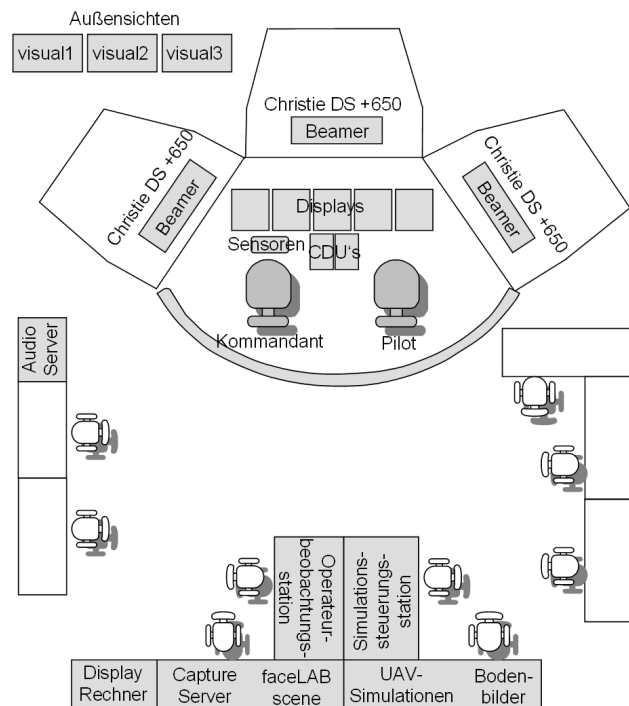


Abbildung 5.31: Versuchsaufbau

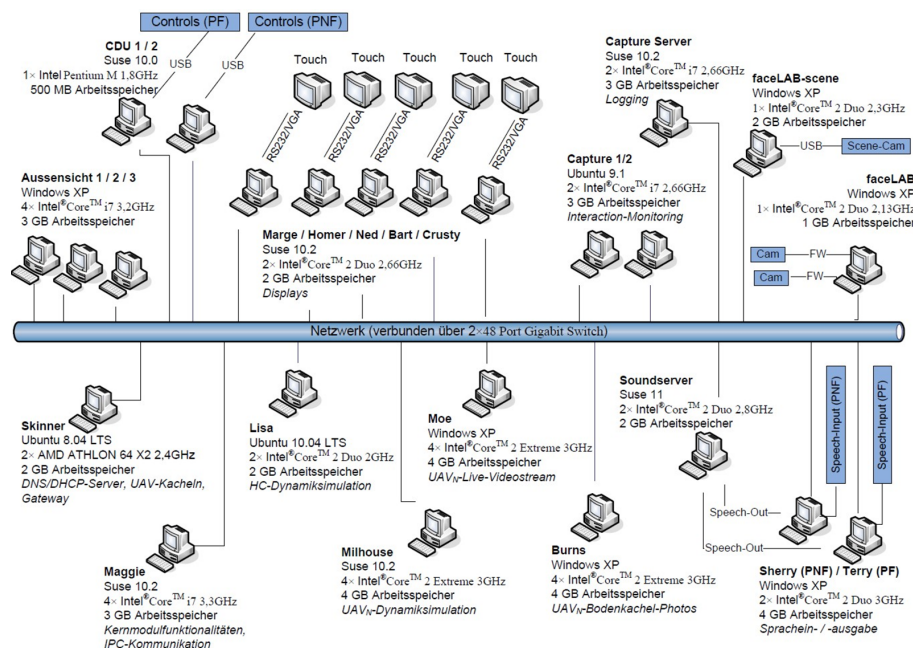


Abbildung 5.32: Verwendete Rechnerkonfiguration in den Experimentalkampagnen

5.2 Durchführung

Dieses Kapitel umfasst Informationen zu den an den Experimenten beteiligten Versuchspersonen sowie die Darstellung des Versuchsablaufes.

5.2.1 Versuchspersonen

Für die Umsetzung des in Kapitel 5.1 vorgestellten Szenarios wurden militärische Hubschrauberpiloten gewählt. Sie verfügen über das notwendige militärische und taktische Wissen für die Durchführung der hier zugrunde liegenden luftgestützten Einsatzmission. Das zusätzlich benötigte Wissen und die Fähigkeit zur FMS-basierten Führung von UAVs, sowie die damit verbundene Aufklärungsaufgabe, die hier dem Kommandanten des Hubschraubers zusätzlich übertragen wurde, stellte für die Versuchspersonen zunächst eine neue Aufgabe dar, die im Rahmen von Trainingsmissionen erlernt werden musste (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Für die Versuchsdurchführung wurden insgesamt acht militärische Hubschrauberpiloten vorgesehen. Die Altersspanne der Piloten war von 26 bis 43 Jahren (mittleres Alter 32,5 Jahre). Hinsichtlich des Erfahrungsspektrums ließen sich die Hubschrauberpiloten in zwei Gruppen, erfahren und weniger erfahren, mit je 4 Personen kategorisieren. Die weniger erfahrenen Operateure besaßen ein Durchschnittsalter von 27,5 Jahren. Ihre Erfahrung erstreckte sich ausschließlich auf eine fliegerische Erfahrung, die im Mittel bei 309 Stunden lag. Das durchschnittliche Alter der erfahrenen Gruppe betrug 37,5 Jahre. Sie wiesen sowohl fliegerische Erfahrungen als Piloten (durchschnittlich 1242,5 Stunden), als auch Erfahrungen als verantwortlicher Luftfahrzeugführer (Kommandant) von durchschnittlich 925 Stunden auf. Eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Versuchspersonen, ihre Einsatz- und Verwendungserfahrung findet sich hierzu in Tabelle 5.5.

VERSUCHS- PERSON (ALTER)	FLUGERFAHRUNG PILOT [H]	FLUGERFAHRUNG KOMMANDANT [H]	HC- MUSTER	ZUSATZ- QUALIFIKATION
1 (33 Jahre)	835	300	EC 135, Bo 105	Gebirgsflug, Einsatz Erfahrung, stellv. Schwarmführer
2 (26 Jahre)	250	—	EC 135, Bo 105	keine
3 (28 Jahre)	366	—	EC 135, Bo 105, UH1D	Einsatz Erfahrung
4 (26 Jahre)	220	—	UH-1D, Alouette II	keine
5 (42 Jahre)	1900	1100	UH-1D, NH 90	Gebirgsflug, Einsatz Erfahrung, Fluglehrer
6 (43 Jahre)	1535	2000	UH-1KD, NH 90	Fluglehrer (IFR/VFR)
7 (32 Jahre)	700	300	Bo 105	Schwarmführer, Einsatz Erfahrung
8 (30 Jahre)	400	—	Bell 206 , KIOWA, Bo 105	keine

Tabelle 5.5: Versuchspersonen der Experimentalkampagne

Ferner verfügten zwei der erfahrenen Hubschrauberpiloten zusätzlich über eine Ausbildung als Schwarmführer, welche für die Multi-UAV-Führung als besonders hilfreiche Qualifikation erachtet wurde.

5.2.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf der Experimentalkampagne umfasste für jeden Operateur zwei Tage. Hierbei wurde der erste Tag für das Training der Operateure verwendet, der zweite Tag diente zur Erhebung der Messdaten.

Nach einer Einführung in den Simulator erfolgte zunächst ein mehrstufiges Training. Dieses Training hatte zum Ziel, die Operateure, sowohl mit der Simulationsumgebung, als auch mit der für sie neuartigen Aufgabe, der Führung von einem bzw. drei UAVs, vertraut zu machen. Hierbei sollten die Operateure schrittweise an die Bedienungsmöglichkeiten des Operateurarbeitsplatzes herangeführt werden. Um dies zu erreichen, wurde die Komplexität der Übungen sukzessive gesteigert, beginnend zunächst mit einer rein FMS-basierten Führung von nur einem UAV, bis hin zu einer komplexen Mission mit drei UAVs, die verschiedene Umplanningvorgänge, hervorgerufen durch bedrohte Landezonen sowie Radarerfassungen durch SAM-Stellungen, erforderte. Eine detaillierte Darstellung des Eingewöhnungs- und Trainingstages findet sich hierzu in Tabelle 5.6.

VERSUCHSTAG	DAUER	AKTION
Tag1	10 min	mündliche Einweisung in den Simulator
Tag1	20 min + Pause 10 min	Einweisung in die Bedienung des UAV-Operateurarbeitsplatzes
Tag 1	30 min + Pause 10 min	Führung 1 UAV Modifikation der UAV-Route, Einfügen, Verschieben, Löschen und UAV-Routenwegpunkten
Tag 1	30 min + Pause 10 min	Routenaufklärung mit 1 UAV Vorgehen Objektidentifizierung
Tag 1	30 min + Pause 10 min	Führung 3 UAVs Modifikation der UAV-Route, Einfügen, Verschieben, Löschen und UAV-Routenwegpunkten
Tag 1	40 min + Pause 10 min	Routenaufklärung mit 3 UAVs Vorgehen Objektidentifizierung
Tag 1	20 min	Einweisung in die Befragungstechniken NASA-TLX, online SAGAT-TEST
Tag 1	60 min	Pause
Tag 1	20 min	Briefing Komplextraining Führung 3 UAVs, in Anlehnung an das Test-Szenario
Tag 1	35 min	Komplextraining

Tabelle 5.6: Versuchsplan Tag1: Einweisung und Training

Ferner wurden die Operateure am Vorbereitungstag mit den im Rahmen der Experimente verwendeten Messwerterfassungsmethoden vertraut gemacht. Dies umfasste die Erläuterung und Anwendung des NASA-TLX Fragebogens sowie des Zusatzfragebogens zur Erfassung des Operateur-Situationsbewusstseins, aber auch das Gewöhnen an die Maßnahmen zur Blickbewegungsmessung einschließlich der dafür nötigen Kalibrierungsarbeiten. Zudem erhielten die Operateure für das abschließende Komplextraining ein taktisches Missionsbriefing, ähnlich wie in den Messmissionen des nachfolgenden Tages (vgl. Abschnitt 5.2.3). Sowohl das Briefing, als auch die Trainingsmission der Komplexmission umfassten dabei alle relevanten Merkmale der Messmissionen.

Der zweite Tag der Experimentalkampagne (Tabelle 5.7) widmete sich im Wesentlichen der Messwerterfassung. Zur Auffrischung der am Vortag erlernten FMS-basierten UAV-Führung und der Objektidentifizierung wurde vor der ersten Messmission das Komplextraining des Vortages, einschließlich

des dazu gehörigen Briefings wiederholt. Hierbei galt es, mögliche Bedien-, oder Handlungsfehler infolge Vergessens für die nachfolgenden Messmissionen zu reduzieren.

Anschließend erfolgten die beiden Messmissionen mit der Führung von einem bzw. drei UAVs. Zu jeder Messmission gab es jeweils ein zugehöriges Missionsbriefing, sowie im Nachhinein ein Debriefing (vgl. Abschnitt 5.2.3).

VERSUCHSTAG	DAUER	AKTION
Tag 2	20 min	Wiederholung Briefing Komplextraining
Tag 2	35 min	Wiederholung Komplextraining
Tag 2	20 min	Pause
Tag 2	20 min	Briefing Mission 1 - Führung 1 UAV
Tag 2	95 min	Datenerhebung Mission 1 - Führung 1 UAV
Tag 2	10 min	kurzes Debriefing
Tag 2	20 min	Briefing Mission 2 - Führung 3 UAVs
Tag 2	95 min	Datenerhebung Mission 2 - Führung 3 UAVs
Tag 2	45 min	Debriefing

Tabelle 5.7: Versuchsplan Tag2: Datenerfassung

5.2.3 Briefing und Debriefing

Ziel des Briefings ist es, die Versuchspersonen in einen möglichst realistischen Situationskontext zu versetzen und auf die bevorstehende Mission sowie die damit verbundenen Aufgaben vorzubereiten. Aus militärischer Sicht wird diese Wirkung zusätzlich verstärkt, da im Briefing die Befehlsausgabe für den Einsatz erfolgt. Für die Umsetzung des Briefings wurde auf Vorschriften, Erfahrungsberichte und Dokumentenvorlagen aus Einsätzen der Bundeswehr zurückgegriffen. Die verwendeten Dokumente unterliegen der Geheimhaltungsstufe „Verschlussache-NUR FÜR DEN DIENSTGEBRAUCH, VS-NfD“. Demzufolge muss hier auf eine umfassende Darstellung des Briefings verzichtet werden. Im Folgenden wird daher nur ein Überblick über die wesentlichen Inhalte gegeben.

MISSIONSBRIEFING:

Zu jeder Messmission (1/3 UAVs) sowie für das Komplextraining erhielten die Operateure jeweils im Vorfeld ein taktisches Missionsbriefing. Das Briefing umfasst die wesentlichen Punkte der Operationsführung, ergänzende Beiträge des Wetter- und Nachrichtendienstes, sowie der im Vorfeld gewonnene Aufklärungsergebnisse. Es setzt sich somit aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

Lage und Auftrag: Hier wird das aktuelle Lagebild dargestellt, der Missionsauftrag, die dabei verfolgte Absicht in der Mission und die in der Mission enthaltenen Missionsphasen vorgestellt.

Wetter: Hier werden die Operateure über die zu erwartenden meteorologischen Bedingungen während des Missionsablaufes (z.B. Luftdruckgebiete, Niederschläge, Sichtbedingungen) informiert.

Nachrichtendienstliche Einschätzung: Sie dient dazu die Operateure bezüglich der zu erwartenden gegnerischen Waffensysteme, deren Einsatzbereiche, Limitationen, als auch die damit in Zusammenhang stehende Bedrohung für die Mission und den Hubschrauber zu informieren. Ferner wird eine Einschätzung hinsichtlich der Positionierung möglicher Objekte (Hin-/Rückflugroute, HOA) auf Basis der letzten nachrichtendienstlichen Erkenntnisse weitergegeben, sowie daraus resultierende Anforderungen der Flugprofile für Hubschrauber und UAVs abgeleitet.

Fliegender Teil: Dieser umfasst den Zeitplan der Mission, die zu tätigen Aufgaben für Hub-schrauber und UAVs, und definiert den vorgesehen zeitlichen Abstand zwischen UAVs und Hub-schrauber. Ferner werden hier aus der Voraufklärung gewonnene Luftbilder der missionsrelevanten Landezonen und des Einsatzgebietes für die bessere Orientierung der Operateure im fremden Einsatzgebiet vermittelt. Zudem erfolgt in diesem Teil die Erläuterung der Regeln für den Einsatz („*Rules of Engagement*“).

Gesamtrisikoeinschätzung und Abbruchkriterien: Die Gesamtrisikoeinschätzung bietet eine zusätzliche Übersicht über die bereits zuvor genannten feindlichen Waffensysteme, deren Auftreten in der Mission und die eingeschätzte Bedrohung für die Missionsdurchführung. Ferner erfolgt eine Festlegung definierter Abbruchkriterien, wie beispielsweise Wetter unter Flugminimum, oder Verlust von mehr als 50 Prozent der UAV-Flotte.

DEBRIEFING:

Das Debriefing dient dem Zweck Auffälligkeiten im Verhalten der Operateure unmittelbar nach Beendigung der Versuchsdurchführung zu hinterfragen, aber auch verschiedene subjektive Einschätzungen der Versuchspersonen bezüglich der Versuchsumgebung, dem Training und möglichen Auswirkungen der Messwerterfassung in Erfahrung zu bringen. Ein Debriefing der Operateure fand jeweils im Anschluss an die Messwerterfassungs-Experimente statt. Das erste Debriefing erfolgte hierzu nach der ersten Messmission (1 UAV) mündlich in kurzer, informeller Form, mit dem Ziel die Operateure bezüglich im Experiment erkannter Verhaltensauffälligkeiten zu befragen.

Das Debriefing nach der zweiten Messmission (3UAVs) hingegen diente dazu Einzelheiten z.B. über die Simulationsumgebung, die Durchführungsmöglichkeit der Mission, die Führung der UAVs, aber auch die möglichen Einschränkungen bei der Missionsdurchführung infolge der verwendeten Messtechnik in Erfahrung zu bringen. Um dies zu ermitteln wurde von den Operateuren in einem ausführlichen Missionsdebriefing ein entsprechender Fragebogen (vgl. Anhang A) ausgefüllt. Inhaltlich umfasst dieser Fragebogen im Wesentlichen folgende Punkte.

- Eignung der Operateurarbeitsplatzumgebung für die Führungsaufgabe, die Objektidentifizierung und die SAM-Lokalisierung
- Fragen zum Training in Hinblick auf die vorbereitende Wirkung für die Messmissionen
- Fragen zum Briefing (Informationsgehalt und Realitätsnähe)
- Akzeptanz der Messanlage (Einschränkungen, Korrekturhinweise, Auswirkungen der Unterbrechungen, Einfluss auf das Operateurverhalten)
- Eignung des Simulators (insbesondere des Kommandantenarbeitsplatzes)
- Versuchsspezifische Fragen (Wirkung der Versuche auf die Operateure, Selbsteinschätzung von auftretenden Überforderungssituationen/ Unterforderungen, vorhersehbares Verhalten der UAVs, Einfluss der UAV-Führung auf das Situationsbewusstsein)
- Versuchsfremde Fragen (bzgl. Erkennen von Über-/Unterforderung von Crewmitgliedern, Handlungsalternativen von Crewmitgliedern, als auch eines Assistenzsystems im Falle erkannter Über-/Unterforderung)

5.3 Akzeptanz der Simulationsumgebung

Zur Beurteilung der Akzeptanz der Simulationsumgebung wurden den Besatzungen Fragebögen (vgl. Anhang A) im Rahmen des Debriefings vorgelegt. Im Fokus der Betrachtungen stand eine Evaluierung der Eignung der Simulationsumgebung, wie auch des UAV-Operateurarbeitsplatzes, ebenso wie die Durchführbarkeit der Aufklärungsaufgabe unter den hier gegebenen Bedingungen. Ferner wurde der Einfluss der verwendeten Messtechnik (z.B. Blickbewegungserfassung, subjektive Befragung) auf das Operateurverhalten, sowie die Auswirkung der ausgeübten Belastungssteigerung auf die Operateure erfragt.

5.3.1 Eignung des Kommandantenarbeitsplatzes

Abbildung 5.33 zeigt die Bewertung des im Hubschraubercockpit integrierten Arbeitsplatzes des UAV-Operators unterteilt in eine Bewertung der Durchführbarkeit der Führung der UAVs mit Hilfe vorgeplanter, doch durch den Operateur modifizierbarer Routen (FMS-basiert), die Durchführbarkeit der Objektidentifizierung, sowie der Klassifizierung mit Hilfe der dafür zur Verfügung stehende Modi (FMS-/RECCE-/CAM-Mode) und den damit verbundenen Funktionalitäten.

Die Durchführung der Objektidentifizierungsaufgabe wurde als nicht zu komplex, und sowohl mit einem, als auch mit drei UAVs als gut durchführbar bewertet. Geringfügige Beanstandungen wurden ausschließlich bezüglich der erforderlichen Anzahl an manuellen Einzelaktionen bei der Durchführung dieser Aufgabe angemerkt.

Der UAV-Operateurarbeitsplatz wurde von den Versuchspersonen insgesamt als gut bewertet. Lediglich die möglichen Vorteile der Anwendbarkeit der UAV-Führung aus dem Hubschraubercockpit, als möglichen zukünftigen Führungsansatz, waren für die Kommandanten im Rahmen der Experimente noch nicht ausreichend ersichtlich. Den Grund für diese zurückhaltende Position stellt die in diesen Experimenten gezielt herbeigeführte Steigerung der Belastung und damit der subjektiven Beanspruchung der Operateure dar, die dazu führte, dass sie ihre eigentliche Aufgabe, als Kommandant des Hubschraubers, nur mehr in sehr geringem Maße wahrnehmen konnten.

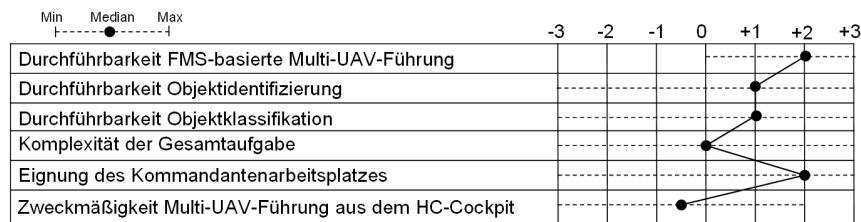


Abbildung 5.33: Subjektive Bewertung des Kommandantenarbeitsplatzes (-3: sehr schlecht, +3: sehr gut)

5.3.2 Vorbereitung auf die Multi-UAV-Führung

Abbildung 35 zeigt die Bewertung der Operateure für die Vorbereitung der Messflüge durch das Training. Die hierbei durchgeführte sukzessive Komplexitätssteigerung wurde durchweg von allen Operateuren als sehr positiv und ausreichend für die Durchführung der Messmissionen betrachtet. Ebenso positiv wurden die Missionsbriefings bewertet, die dazu dienten, die Operateure in den Missionskontext hinein zu versetzen und die dafür erforderliche Information zu transportieren.

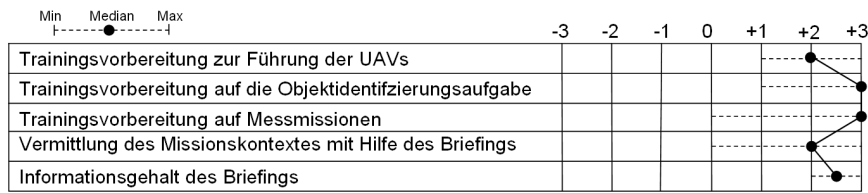


Abbildung 5.34: Subjektive Bewertung der Vorbereitung (-3: sehr schlecht, + 3: sehr gut)

5.3.3 Empfundene Beanspruchungssteigerung

Ziel der Experimentalkampagne war es, die Operateure gezielt in Überforderungssituationen zu drängen, um so das Auftreten selbstadaptiver Strategien beobachten zu können. Um dies zu erreichen, ohne dabei die Natur der beobachteten Indikatoraufgabe zu ändern, wurden die Operateure im Rahmen der Missionsdurchführung mit zusätzlichen Zeitvorgaben, sowie eingebetteten Nebenaufgaben konfrontiert. Unabhängig von der zu untersuchenden Konfiguration (Führung mit einem UAV bzw. Führung mit drei UAVs) bestätigten die Operateure retrospektiv im Rahmen des Fragebogens (vgl. Abbildung 5.35) das Auftreten von kurzfristigen Überforderungssituationen. Als Auslöser wurden hierfür im Wesentlichen folgende Gründe genannt:

- Örtliche Anhäufungen von aufzuklärenden Objekten. In diesem Zusammenhang wurde in erster Linie die Anzahl fehlerfrei durchzuführender Schritte von der Erkennung bis hin zur Klassifikation als ein Grund genannt. Ferner wurde die zeitliche Belastung während der Objektidentifizierung hervorgehoben. So ist die Zeit für die Durchführung der Objektidentifizierung sehr limitiert. Längere Durchführungszeiten führen zu unerwünschten Aufklärungslücken in den Bodenbildern der UAVs.
- Die Unsicherheit vergessener bzw. bereits durchsuchter Bodenkachelbilder, insbesondere bei der Führung von drei UAVs. Ein versehentliches mehrfaches Durchsuchen von Bodenkachelbildern resultiert in unerwünschten Zeitverlusten.
- Radarpeilungen von SAM-Stellungen, insbesondere bei gleichzeitigen Peilungen mehrerer SAM-Stellungen auf ein UAV, aber auch bei einer Anpeilung verschiedener UAVs durch unterschiedliche SAM-Stellungen aufgrund des damit vorherrschenden unmittelbaren Gefährdungspotenzials.

Längerfristig anhaltende Überforderungssituationen, die eine Ermüdung des Operateurs und damit verbunden ermüdungsbedingtes, verändertes Verhalten zur Folge hätten, bestanden für einen Großteil der Operateure nach eigenen Angaben nicht. Vereinzelte Anmerkungen zu einer längerfristigen anhaltenden Überforderung wurden lediglich bezüglich der Rückflugroute (Egress) geäußert. Bezogen war diese Anmerkung auf die Bearbeitung mehrere SAM-Lokalisierungen in kurzer Zeitfolge.

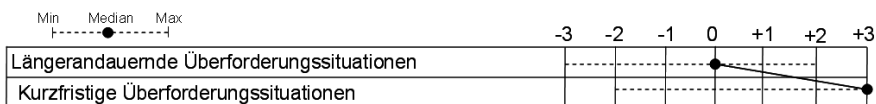


Abbildung 5.35: Subjektive Bewertung der durchgeführten Beanspruchungssteigerung (-3: nicht erreicht, +3: gut erreicht)

5.3.4 Akzeptanz Messanlage

Abbildung 5.36 zeigt die Bewertung der Messanlage zur Blickbewegungserfassung hinsichtlich der Akzeptanz der Operateure. Die wesentliche Einschränkung stellte hierbei der nur limitierte Erfassungsbereich der Kameras von *faceLAB* dar, der die Bewegungsfreiheit der Operateure, insbesondere die Kopfbewegungen, deutlich einschränkte. Da ein wesentliches Ziel der Experimente in der Erfassung des Blickverhaltens der Operateure lag, erhielten die Operateure bei Verschlechterung der Kopf-/Augenerfassung entsprechende Korrekturhinweise vom Versuchsleiter. Auch wenn diese Korrekturhinweise vereinzelt als störend bewertet wurden, so zeigte sich im Rahmen der Experimente, dass in wirklich kritischen Belastungs- und Beanspruchungssituationen Korrekturhinweise durch die Operateure vollständig ignoriert wurden.

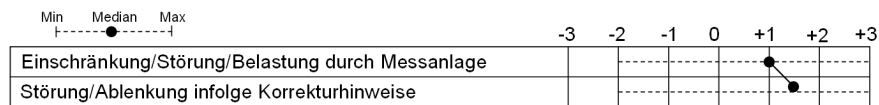


Abbildung 5.36: Subjektive Bewertung der Blickbewegungserfassung (- 3: keine Auswirkung, + 3: große Auswirkung)

5.3.5 Auswirkungen zeitdiskreter Unterbrechung zur Fragebogenerhebungen

Um in diskreten Zeitabständen eine Aussage der Operateure über ihre aktuell subjektiv empfundene Beanspruchung, sowie ihr zu dieser Zeit vorliegendes Situationsbewusstsein zu erhalten, wurde die Simulation während dieser Befragungen angehalten. Durch diese Unterbrechungen werden die Operateure aus ihrem aktuellen Aufgaben- und Situationskontext herausgelöst. Abbildung 38 zeigt hierzu die von den Operateuren bewertete Auswirkung dieser Unterbrechung auf die Aufgabenausführung, das Situationsbewusstsein und die Aufmerksamkeit. Hierbei zeigt sich, dass diese Unterbrechungen für die Operateure nur als geringfügig störend angesehen wurden.



Abbildung 5.37: Subjektive Bewertung des Einflusses der Unterbrechungen [5: massive Einschränkung, 1: keine Einschränkung]

Kapitel 6

Experimentelle Ergebnisse

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den beobachtbaren Auswirkungen der durchgeführten Belastungssteigerungen (vgl. Kapitel 4) auf die Größen Beanspruchung, Leistung und Verhalten der Versuchspersonen. Dabei wird die Belastung sowohl entlang des Missionsverlaufes (*Ingress*, *HOA*, *Egress*) sowie durch die Erhöhung von einem auf drei UAVs gesteigert.

Die im Folgenden vorgestellten experimentellen Befunde beziehen sich auf die Versuchspersonen (VP5-VP8) der zweiten Versuchskampagne. Im Gegensatz zur ersten Kampagne (VP1-VP4) zeichnet sich diese durch eine deutlich höhere Dichte an aufzuklärenden Objekten innerhalb der Mission aus. Diese Änderung wurde vorgenommen, da die auf die Versuchspersonen wirkende Belastung in der ersten Kampagne nicht ausreichte, um die gewünschte hohe Beanspruchung zu induzieren.

Infolge der Adaption des Versuchsdesigns reduziert sich die Anzahl der Versuchspersonen unter vergleichbaren Versuchsbedingungen auf VP5-VP8. Eine statistische Auswertung der gemessenen Daten ist damit nur im Hinblick auf gewisse Fragestellungen nicht jedoch über das Pilotenkollektiv gemittelt möglich, so dass im Folgenden überwiegend individuelle Betrachtungen der Ergebnisse vorgenommen werden.

6.1 Subjektive Beanspruchung

Die von den Versuchspersonen subjektiv empfundene Beanspruchung wurde für diskrete Zeitpunkte mit Hilfe des NASA-TLX-Fragebogens [Hart und Staveland, 1988] erfasst. Hierfür wurden in jedem Missionsdurchlauf jeweils drei Beanspruchungserfassungen entlang der Hinflugroute (*Ingress*), eine Bewertung im Truppenabsetzgebiet (*HOA*), sowie zwei Bewertungen auf der Rückflugroute (*Egress*) durchgeführt.

Betrachtung subjektiver Beanspruchung über den Missionsverlauf

Abbildung 6.1 zeigt die von den Versuchspersonen (VP5-VP8) über den Missionsverlauf subjektiv empfundene Beanspruchung in der Führung von einem UAV. Die Beanspruchungswerte für *Ingress* und *Egress* repräsentieren dabei das arithmetische Mittel der erhobenen Einzelbefragungen. Da die in diesen Missionssegmenten erhobenen Einzelmessungen nur wenig differieren, kann der Mittelwert als Repräsentant der Einzelwerte gut herangezogen werden.

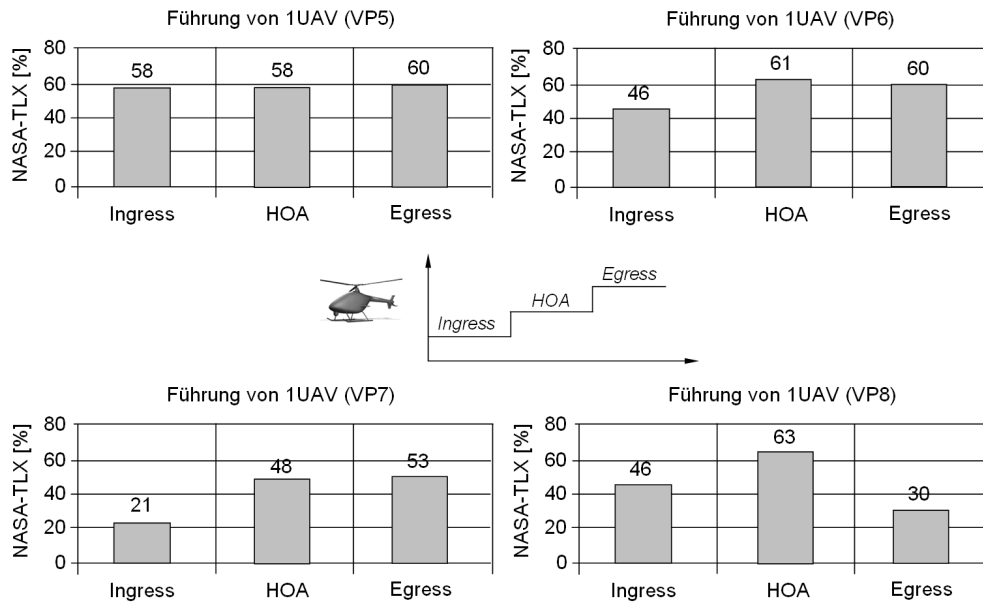


Abbildung 6.1: Subjektive Beanspruchung der Versuchspersonen über den Missionsverlauf bei der Führung von einem UAV

Ungeachtet der graduellen Belastungssteigerung entlang des Missionsverlaufes (beginnend bei Zeitvorgaben im *Ingress*-Segment, erweitert um Umplanungsvorgänge im *HOA*-Gebiet und gesteigert durch zusätzliche SAM-Stellungen im *Egress*-Segment, zeigt sich, dass sich die Beanspruchung der Versuchspersonen über den Missionsverlauf nicht unbedingt und wenn dann auch nicht deutlich erhöht.

So empfanden lediglich die Versuchspersonen VP6-VP8 einen leichten Beanspruchungsanstieg zwischen *Ingress* und *HOA*, nicht jedoch VP5, die im Gegensatz zu den anderen Versuchspersonen bereits im *Ingress* eine höhere Beanspruchung zeigte. Selbst im *Egress*-Missionsabschnitt, in dem durch Hinzufügen von SAM-Stellungen sowohl das Bedrohungspotential, als auch die erforderlichen Aufgaben durch die SAM-Lokalisierungen zusätzlich gesteigert wurden, ist kein weiterer Anstieg in der Beanspruchung der Versuchspersonen VP5-VP7 erkennbar.

Der auffallend geringe Beanspruchungswert von VP8 (Abbildung 6.1) im *Egress* resultiert aus einer singulären TLX-Erhebung. Diese fand unmittelbar nach einem Abschuss des von der Versuchsperson geführten UAVs durch eine SAM-Stellung statt. Da es sich hierbei um eine Mission mit nur einem UAV handelte und gemäß des Missionsbriefings mit Verlust von mehr als 50% der zur Verfügung gestellten UAVs die Mission abubrechen war, war zum Zeitpunkt der Erhebung für die Versuchsperson weder die Erfüllung der Mission, noch die damit verbundenen Anforderungen und Aufgaben relevant.

In der Führung von drei UAVs zeigt sich ein ähnliches Beanspruchungsempfinden der Versuchspersonen. Ungeachtet der erhöhten Anforderungen in der Führung von drei UAVs, hervorgerufen durch die gestiegene Anzahl an zu überprüfenden Bodenbildern der weiteren UAVs und die damit verbundene erhöhte Zeitkritikalität, zeigen auch hier die subjektiven Beanspruchungswerte der Versuchspersonen allenfalls einen nur sehr mäßigen Anstieg der Beanspruchung über den Missionsverlauf (Abbildung 6.2)

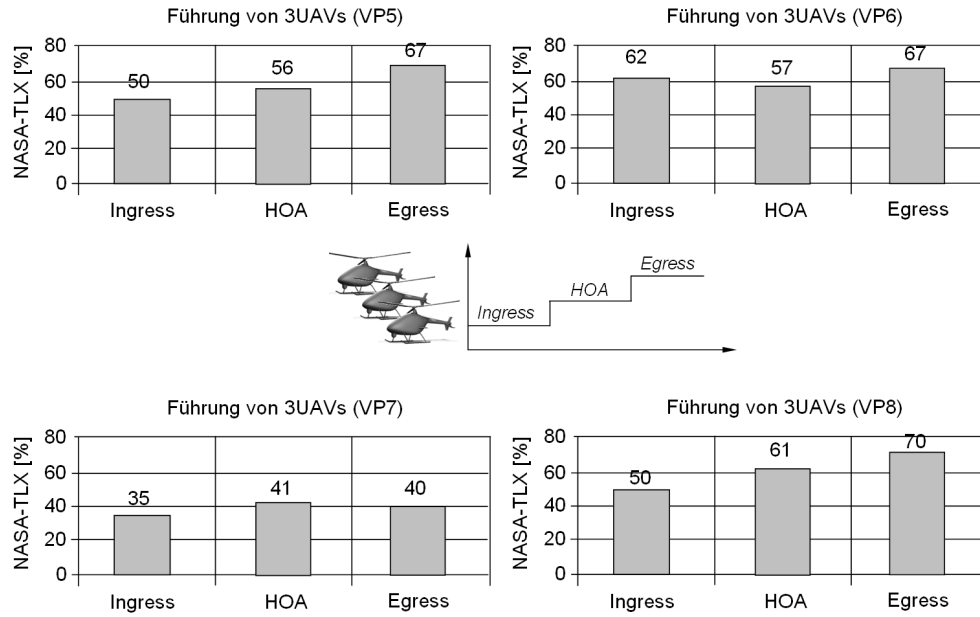


Abbildung 6.2: Subjektive Beanspruchung der Versuchspersonen über den Missionsverlauf bei der Führung von drei UAVs

Diese Resultate entsprechen zunächst nicht dem erwarteten Ergebnis. Aufgrund der massiven Steigerung der Belastung durch entsprechende Aufgaben wurde mit einem wesentlich deutlicher zu verzeichnendem Anstieg der subjektiven Beanspruchung der Versuchspersonen über dem Missionsverlauf und beim Übergang von einem auf drei UAVs gerechnet. Dies war jedoch so nicht zu beobachten.

Als Ursache für diese nahezu stagnierende Beanspruchung der Versuchspersonen wird der bereits in Kapitel 4 dargestellte Selbstregulationsmechanismus angenommen. Dieser ermöglicht es durch Anwenden von *selbstadaptiven Strategien* die Beanspruchung in einen für die Versuchspersonen handhabbaren Bereich zu halten. Die hierbei angewendeten Strategien werden in Abschnitt 6.3 detailliert betrachtet.

Es wird also davon ausgegangen, dass die Anwendung verschiedener *selbstadaptiver Strategien* (vgl. Abschnitt 6.3) zu einem entsprechend reduzierten Beanspruchungsempfinden der Versuchspersonen geführt hat.

Betrachtung subjektiver Beanspruchung in der Führung von einem bzw. drei UAVs

In einem weiteren Auswerteschritt soll nun die Beanspruchung bei der Führung eines UAVs mit der bei der Führung von drei UAVs verglichen werden. Allerdings zeigt sich, dass die NASA-TLX Skalen von den einzelnen Versuchspersonen individuell sehr stark unterschiedlich verwendet werden. Der aus dem NASA-TLX resultierende Beanspruchungswert ergibt sich aus einer Bewertung der an der Beanspruchung beteiligten Komponenten, definiert durch die im Verfahren betrachteten möglichen Beanspruchungsquellen und einer Intensitätsangabe für diese einzelnen Komponenten. Um eine interindividuelle Betrachtung der Beanspruchungswerte vornehmen zu können, sind in einem ersten Schritt die individuellen TLX-Werte der einzelnen Versuchspersonen zu normieren. Hierfür wird zunächst aus den erhobenen Einzelwerten das arithmetische Mittel berechnet und auf ein festes Intervall zwischen null und hundert abgebildet. Dieses Vorgehen wird für jede Versuchsperson und jede untersuchte Konfiguration (1/3 UAVs) durchgeführt.

$$TLX_{VPN_{norm}} = \frac{TLX_{VPN_{Durchschn.}} - \text{Min}_{TLX_{VPN}}}{\text{Max}_{TLX_{VPN}} - \text{Min}_{TLX_{VPN}}} \cdot 100$$

Die daraus resultierenden Werte können bereits für einen interindividuellen Vergleich herangezogen werden. Um ferner einen möglichst realistischen Beanspruchungswert zu erhalten, der den Beanspruchungsbereich der im Rahmen der Versuche abgegebenen Einzelerhebungen widerspiegelt, werden diese normierten Einzel-TLX-Werte im nachfolgenden Schritt auf das Intervall zwischen dem minimalen und maximalen Gesamt-TLX-Wert aller untersuchten Versuchspersonen abgebildet.

$$TLX_{\text{final}} = TLX_{\text{VPN}_{\text{norm}}} \cdot \frac{\text{Max}_{TLX_{\text{gesamt}}} - \text{Min}_{TLX_{\text{gesamt}}}}{100} + \text{Min}_{TLX_{\text{gesamt}}}$$

Abbildung 6.3 zeigt das Ergebnis dieser normierten und transformierten subjektiven Beanspruchungswerte für die Führung von einem bzw. drei UAVs.

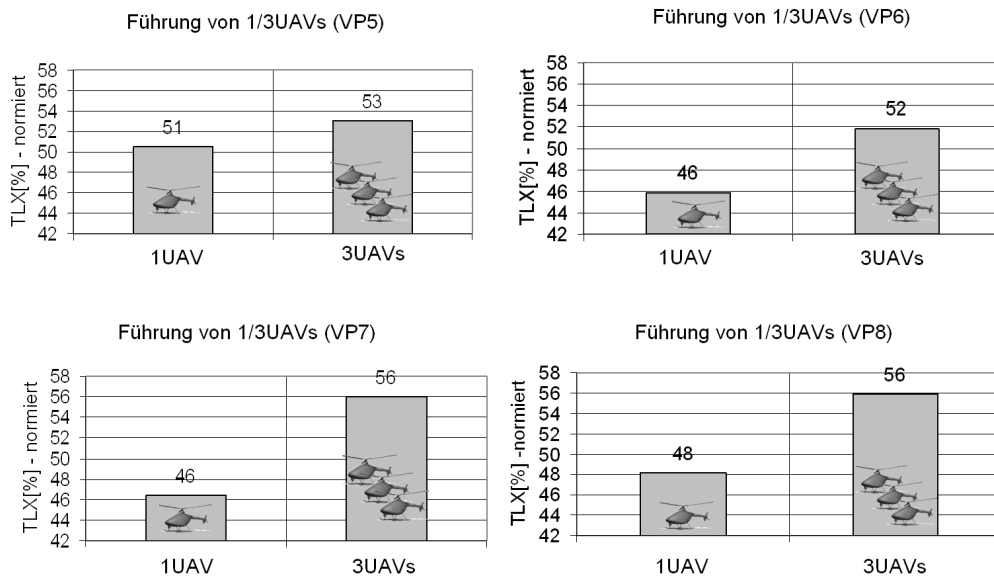


Abbildung 6.3: Vergleiche subjektiver Beanspruchung der Operateur zwischen der Führung mit einem und drei UAVs

Es zeigt sich, dass die Versuchspersonen die Führung von drei UAVs beanspruchender empfinden, als die Führung nur eines UAVs. Doch ist der Beanspruchungsanstieg auch hier deutlich niedriger als erwartet. Eine mögliche Ursache für diesen nur sehr schwach ausgeprägten Anstieg mag in der Anzahl der durch die Versuchspersonen entdeckten und bearbeiteten Objekte liegen. Diese war in der Führung von drei UAVs deutlich geringer als in der Führung von einem UAV, wodurch sich auch der für die Versuchspersonen wahrnehmbare Aufwand in der Aufgabenbearbeitung entsprechend reduzierte (vgl. Kapitel 6.2).

6.2 Leistung

Die von den Versuchspersonen im Rahmen der Missionsdurchführung erbrachte Leistung wird anhand verschiedener Leistungsparameter bezogen auf die hier im Fokus stehende Objektidentifizierungsaufgabe betrachtet. Sie umfassen:

- Anzahl der von den Versuchspersonen klassifizierten Objekte,
- Anzahl fehlerhafter Klassifizierungen,
- Mittelwerte der Objektidentifizierungszeiten, sowie
- Anzahl Bedienfehler im Umgang mit dem System.

6.2.1 Anzahl klassifizierter Objekte

Klassifizierte Objekte sind Objekte, die von der Versuchsperson erkannt, und deren Klassifikationsergebnis (freundliches/feindliches Objekt) in das System eingetragen wird, unabhängig davon, ob diese Klassifikation korrekt oder fehlerhaft ist.

Da die gesamte Anzahl aufzuklärender Objekte sowohl in den hier betrachteten Missionssegmenten (*Ingress*, *HOA*, *Egress*), als auch zwischen den betrachteten Konfigurationen (1/3 UAVs) geringfügig variiert (vgl. Tabelle 6.1) werden im Folgenden die von den Versuchspersonen klassifizierten Objekte im Verhältnis zu den tatsächlich in den Segmenten platzierten Objekten betrachtet.

Missionssegment	1UAV	3UAVs
<i>Ingress</i>	31	28
<i>HOA</i>	12	14
<i>Egress</i>	10	11

Tabelle 6.1: Gesamte Anzahl der Objekte im Szenario je Missionssegment für die Führung von einem bzw. drei UAVs

Klassifizierte Objekte über den Missionsverlauf

Bei der Führung von einem UAV ist die Klassifikationsrate der Objekte bei allen Versuchspersonen tendenziell eher hoch (vgl. Abbildung 6.4, links). Ungeachtet einer Belastungssteigerung zwischen den Missionssegmenten *Ingress* und *HOA* bleibt die Klassifikationsrate der Versuchspersonen weitestgehend stabil. Die durch Zeitvorgaben und Nebenaufgaben herbeigeführte Belastungssteigerung kompensieren die Versuchspersonen scheinbar ohne Einschränkung auf ihre Klassifikationsleistung.

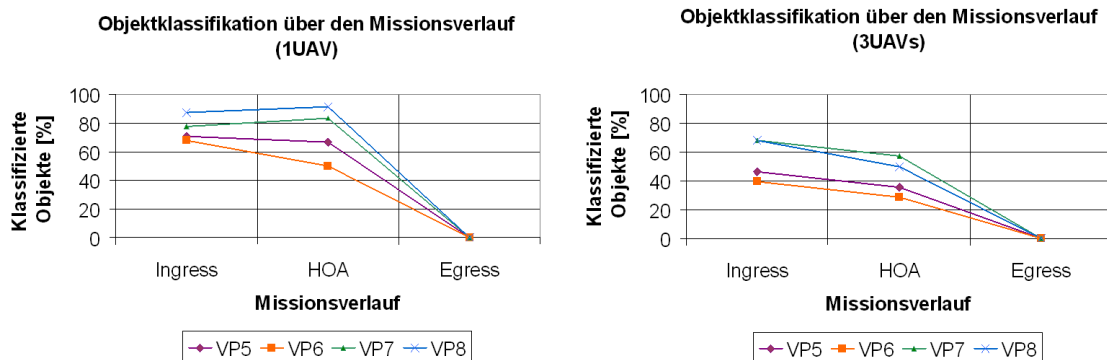


Abbildung 6.4: Anteil der durch die Versuchspersonen klassifizierten Objekte entlang des Missionsverlaufes für die Führung einem (links) und drei UAVs (rechts)

Die Ausnahme bildet hier VP6. Sie bemerkt im *HOA*-Bereich deutlich weniger Objekte, wodurch sich in diesem Fall die Klassifikationsrate im Vergleich zum *Ingress* um 17,7% reduziert. Missions-Beobachtungsprotokolle zeigen, dass sich VP6 bereits unmittelbar nach Erkennen des ersten feindlichen Objektes im Bereich einer Landezone der Aufklärung der alternativen Landezone zuwendet.

Dies hat zur Folge, dass im Umfeld der Landezone positionierte Objekte von VP6 nicht entdeckt und demzufolge nicht klassifiziert wurden. Tatsächlich handelt es sich hierbei um ein strategisch als richtig zu bewertendes Vorgehen, das sich in der Auswertung dieses Performanzparameters jedoch negativ auswirkt.

Betrachtet man die Führung von drei UAVs über den Missionsverlauf (Abbildung 6.4, rechts), so zeigt sich im Vergleich zu der Führung von einem UAV bei allen Versuchspersonen eine um durchschnittlich 19% reduzierte Erkennungs- und Klassifikationsrate von Objekten. Gleichzeitig ist hier ein durchschnittliches Absinken der Klassifikationsrate zwischen Ingress und HOA von 12,5% beobachtbar. Dieses Absinken der Klassifikationsrate lässt sich im Wesentlichen auf ein unstrukturiertes Abscannen der Bodenkachelbilder durch die Versuchspersonen zurückführen. Dies wird in der HOA durch die räumliche Trennung der UAV-Routenführungen (vgl. Abbildung 6.5) weiter verstärkt. Es zeigt sich, dass infolge dieses unstrukturierten Scannens der Bodenkachelbilder eine Vielzahl an Objekten übersehen und daher nicht klassifiziert wird.

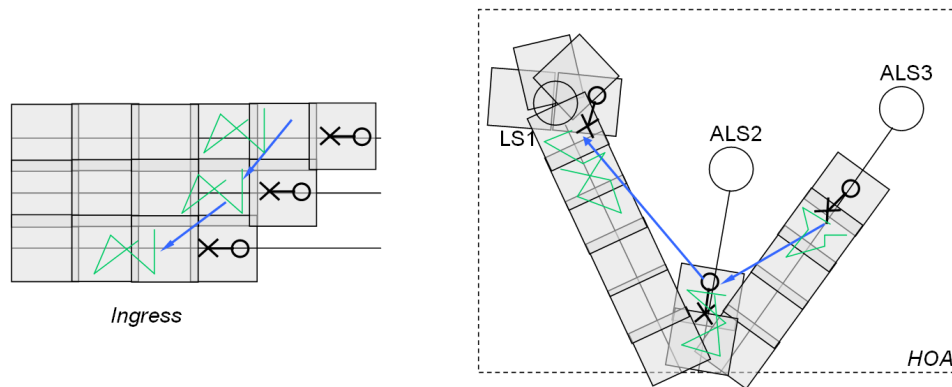


Abbildung 6.5: Typisches scannen von Bodenkachelbildern in den Missionssegmenten Ingress und HOA (grün - lokale Blickpfade während des Scannens der Bodenkachelbilder, blau - Blickwechsel zu den Bodenbildern des nächsten UAVs)

Unabhängig von der Anzahl der zu führenden UAVs zeigt sich, dass die Versuchspersonen in der Missionsphase *Egress* keine Objektklassifikationen vornehmen. In diesem Missionssegment werden die Versuchspersonen neben ihrer Objektidentifizierungsaufgabe mit zusätzlichen SAM-Stellungen konfrontiert. Die damit verbundenen Aufgaben (Missionsmanagement, Umplanungen für HC- und UAV-Routen, SAM-Lokalisierung), sowie die abschnittsweise vorherrschende akute Bedrohungslage, hervorgerufen durch die Radarerfassungen der UAVs führen dazu, dass die Versuchspersonen hier eine Priorisierung ihrer Aufgaben vornehmen. Diese Priorisierung ist Teil der *selbstadaptiven Strategien* und bewirkt, dass Operateure in hohen Beanspruchungssituationen weniger wichtige Aufgaben, in diesem Fall die *Objektsuche* und *Objektidentifizierung*, zurückstellen, oder gar ganz vernachlässigen. Eine detaillierte Darstellung dieses Phänomens findet sich in Abschnitt 6.3.

Klassifizierte Objekte im Missionsverlauf in der Führung von einem bzw. drei UAVs
Abbildung 6.6 zeigt für jede Versuchsperson die prozentuale Anzahl der über den Missionsverlauf klassifizierten Objekte für die Führung von einem bzw. drei UAVs.

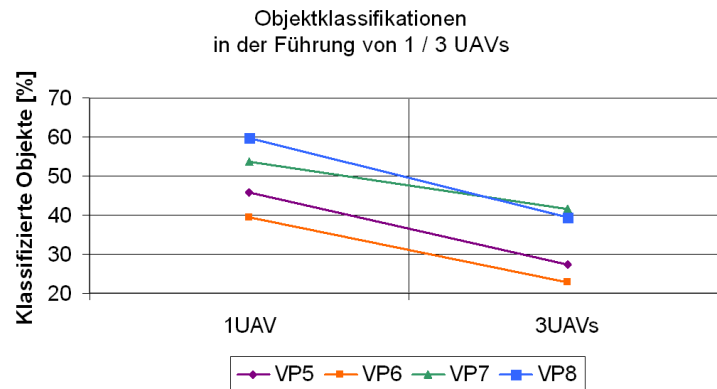


Abbildung 6.6: Anteil klassifizierter Objekte der Versuchspersonen in der Führung von einem UAV bzw. drei UAVs

Die Erhöhung der Anzahl der zu führenden UAVs führt zu einem Absinken der Klassifikationsrate um durchschnittlich 16,8%. Die Ursachen für diesen Rückgang sind zwei Aspekten zuzuordnen:

- Das unstrukturierte Scannen der Bodenkachelbilder durch die Versuchspersonen. Videoanalysen zeigen, dass dieses offenkundig unkoordinierte Vorgehen dazu führt, dass vereinzelte Bodenkachelbilder wiederholt, andere hingegen unzureichend, oder gar nicht durch die Versuchspersonen überprüft werden.
- Die Belastungssteigerung durch den reduzierten zeitlichen Abstand zwischen Hubschrauber und voraus fliegenden UAVs von ursprünglich sieben auf fünf Minuten. Die höhere Anzahl der zu überprüfenden Bodenbilder und die geringere Vorlaufzeit zwischen HC und UAVs führen dazu, dass die Versuchspersonen die Bodenkachelbilder nicht mehr ausreichend sorgfältig genug nach Objekten durchsuchen und insbesondere Objekte in den Randbereichen gescannter Bodenkachelbilder übersehen werden.

6.2.2 Fehler bei der Objektklassifizierung

Betrachtet man das Ergebnis der von den Versuchspersonen durchgeführten Klassifikationen, so zeigt sich, dass Objekte, die von den Versuchspersonen erkannt und klassifiziert wurden, im Allgemeinen richtig klassifiziert wurden. Abbildung 6.7 gibt hierzu eine Übersicht über die Gesamtanzahl der positionierten Objekte, die Anzahl der klassifizierten Objekte, sowie dabei aufgetretenen Fehlklassifikationen, unterteilt in die Missionssegmente, die untersuchten Konfigurationen (ein bzw. drei UAVs), sowie die einzelnen Versuchspersonen. Vernachlässigt wurde hier die Darstellung des *Egress*-Missionssegmentes, in dem von keiner Versuchsperson Objekte klassifiziert wurden.

	Anzahl Objekte (Ingress)	Anzahl klassifizierter Objekte (Ingress)	Falsche Klassifizierung (Ingress)	Anzahl Objekte (HOA)	Anzahl klassifizierter Objekte (HOA)	Falsche Klassifizierung (HOA)	Anzahl Objekte (Ingress)	Anzahl klassifizierter Objekte (Ingress)	Falsche Klassifizierung (Ingress)	Anzahl Objekte (HOA)	Anzahl klassifizierter Objekte (HOA)	Falsche Klassifizierung (HOA)
VP5	31	22	1	12	8	0	28	13	1	14	5	0
VP6	31	21	0	12	6	0	28	11	0	14	4	0
VP7	31	24	0	12	10	0	28	19	1	14	8	0
VP8	31	27	3	12	11	0	28	19	0	14	7	0
	1UAV						3UAVs					

Abbildung 6.7: Klassifikationen und Fehlklassifikationen der Versuchspersonen (VP5-VP8) in der Führung von einem bzw. drei UAVs

Grundsätzlich zeigt sich, dass die durchgeführte Belastungssteigerung keine offensichtliche Auswirkung auf die Anzahl an Fehlklassifikationen besitzt. Eine Ausnahme stellt hier VP8 im Ingress dar, die als einzige Versuchsperson mehrere Fehlklassifikationen aufweist. Sie ist gleichzeitig die Versuchsperson, die im Vergleich mit den anderen Versuchspersonen die meisten der positionierten Objekte erkannt und klassifiziert hat.

Ursache für die bei VP8 auftretenden Fehlklassifikationen ist die Anwendung einer bestimmten *load-shedding* Strategie des Operators, die eine weniger exakte, dafür jedoch zeitlich effizientere Aufgabendurchführung verfolgt (vgl. Abschnitt 6.3). So nutzt diese Versuchsperson für das Treffen ihrer Klassifikationsentscheidungen wiederholt ungenaue Objektdarstellungen im Live-Videostream der UAVs, die keine eindeutige Klassifikation des zugrunde liegenden Objektes ermöglichen. Bedingt durch die nur geringe Vielfalt an möglichen Klassifikationsentscheidungen gelingt es der Versuchsperson, trotz der oftmals ungenauen Darstellung, in vielen Fällen richtig zu klassifizieren. Dennoch kommt es dabei mitunter auch zu den hier beobachteten Fehlklassifikationen. Ungeachtet dieser Detaildiskussion kann allerdings konstatiert werden, dass unter dem Eindruck der erhöhten Belastung und dem in Folge dessen leichten Absinken der relativen Anzahl der von den Versuchspersonen klassifizierten Objekte, es dennoch bei einer hohen Klassifikationsleistung bleibt. Werden Objekte klassifiziert, so werden sie in der Regel auch korrekt klassifiziert. Die selbstadaptiven Strategien bewirken also in diesem Fall die Vermeidung übermäßiger Beanspruchung durch *load-shedding* (d.h. Weglassen von Aufgaben). Die Aufgaben, die dennoch durchgeführt werden, werden auch korrekt ausgeführt.

6.2.3 Zeit zur Objektidentifizierung

Ein weiteres Maß für die Performanz der Versuchspersonen ist die erforderliche Zeit für die Durchführung der Objektidentifizierung. Abbildung 6.8 veranschaulicht diese Zeiten jeweils als arithmetisches Mittel der von den einzelnen Versuchspersonen klassifizierten Objekte in den Missionssegmenten Ingress und HOA, betrachtet für die Führung von einem (Abbildung 6.8, links), als auch von drei UAVs (Abbildung 6.8, rechts).

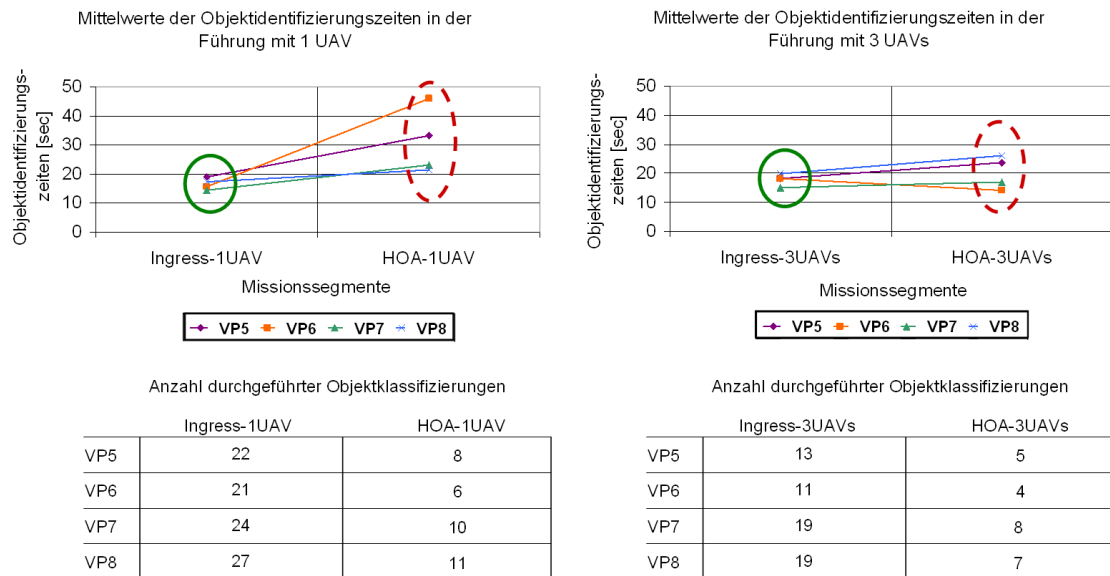


Abbildung 6.8: Durchschnittliche Objektidentifizierungszeiten der Versuchspersonen in den Missionsphasen Ingress und HOA für die Führung von einem (links) bzw. drei UAVs (rechts)

Abbildung 6.8 lässt augenscheinlich vermuten, dass die Mittelwerte der Objektidentifizierungszeiten der Operateure zwischen Ingress und HOA in der Führung von einem UAV tendenziell ansteigen. Betrachtet man hingegen die Verteilung der Objektidentifizierungszeiten basierend auf den zugrunde liegenden Einzelwerten, so zeigen sich unabhängig von der Anzahl der zu führenden UAVs in dem Missionssegment HOA erhebliche Streuungen in den Objektidentifizierungszeiten.

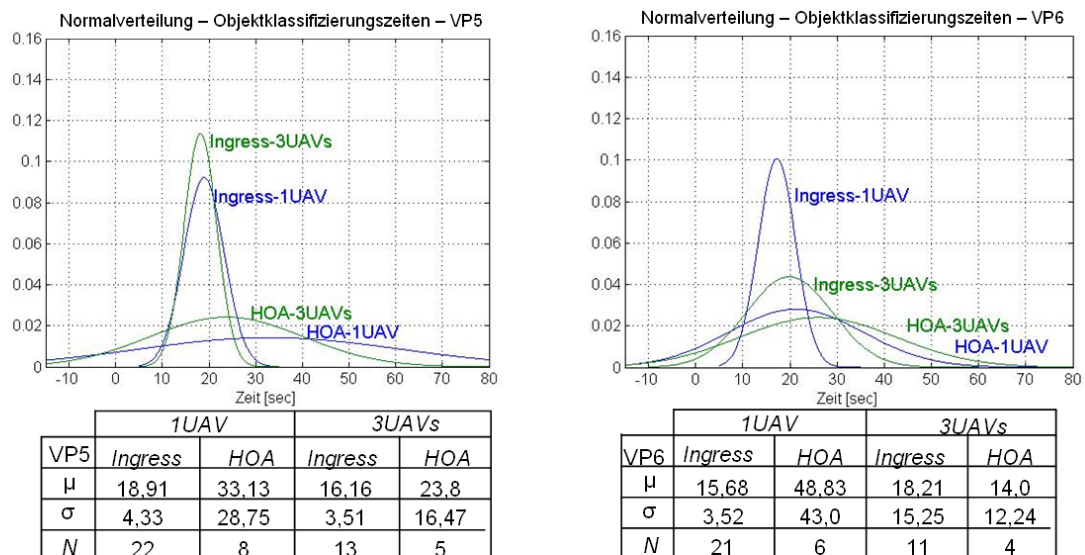


Abbildung 6.9: Normalverteilungen und Standardabweichungen für die Objektidentifizierungszeiten der Operateure für die Missionssegmente Ingress und HOA in der Führung von einem und drei UAVs (VP5 & VP6)

Die Aussagekraft einer Mittelwertbetrachtung im Bereich der HOA ist damit stark eingeschränkt und daher in Abbildung 6.8 jeweils gestrichelt umrandet. Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 zeigen hierzu die Darstellung der Normalverteilungen der einzelnen Objektidentifizierungszeiten, unterteilt in die Versuchspersonen, die Missionssegmente Ingress und HOA und die Führung von einem bzw. drei UAVs. Ausschlaggebend für die hohe Streuung in den HOA-Bereichen ist neben der Variabilität der Einzelwerte, zudem die in der Regel nur geringe Stichprobengröße.

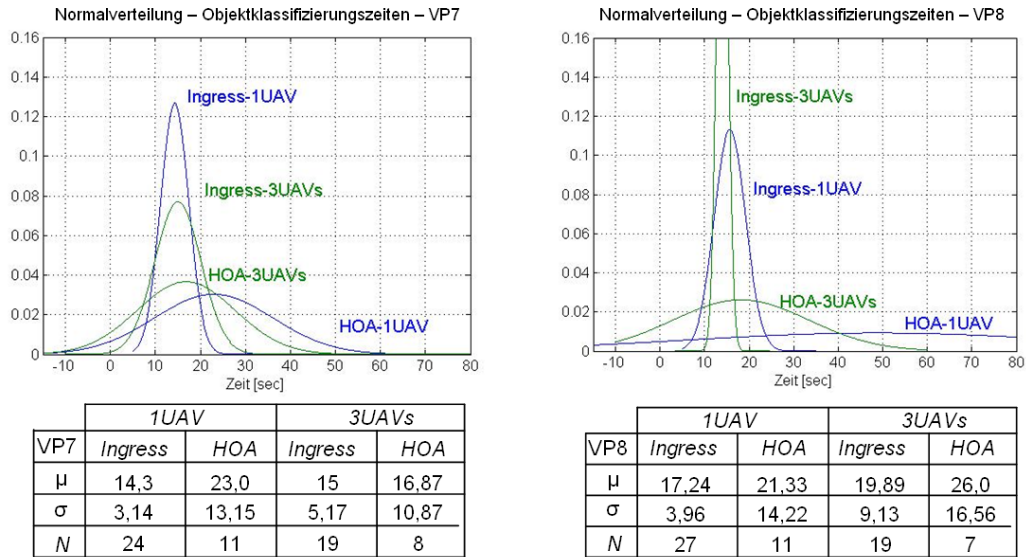


Abbildung 6.10: Normalverteilungen und Standardabweichungen für die Objektidentifizierungszeiten der Operateure für die Missionssegmente Ingress und HOA in der Führung von einem und drei UAVs (VP7 & VP8)

Ursachen für die Variabilität der einzelnen Objektidentifizierungszeiten sind folgende Aspekte:

- Zeitweise verdeckte Sichtbarkeit von Objekten, hervorgerufen durch Szenerie-Objekte wie beispielsweise Bäume oder Häuser, die die direkte Sichtlinie zwischen Kameraausrichtung und Objekt, abhängig von der Position des UAVs, unterbrechen.
- Verwendung eines weiter entfernt positionierten UAVs für die Objektidentifizierung, die eine eindeutige Klassifizierung erschweren und gegebenenfalls einen Wechsel des UAVs für die Klassifizierung erfordern.
- Bedienfehler im Umgang mit System, die wiederholte Aktionen der Versuchsperson und damit mehr Zeit für die Bearbeitung der Aufgabe erfordern.
- Anwendung *selbstadaptiver Strategien*, in diesem Fall das gezielte Zurückstellen und später wieder Aufgreifen der Objektidentifizierung (vgl. Abschnitt 6.3).

Im Gegensatz zu den Objektidentifizierungszeiten in der HOA ist die Anzahl klassifizierter Objekte und damit verfügbarer Zeitwerte im Ingress deutlich höher und die Streuung dieser Werte wesentlich geringer, so dass diese Werte durch einen Mittelwert betrachtet werden können. Ein Vergleich dieser Mittelwerte der Ingress-Objektidentifizierungszeiten für die Führung von einem, als auch drei UAVs zeigt, dass sich hier die Zeiten für die Durchführung der Aufgabe kaum unterscheiden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der zu führenden UAVs kaum eine

Auswirkung auf die Zeiten für die Objektidentifizierung besitzt und diesbezüglich keine Leistungsver schlechterung der Operateure beobachtbar ist.

6.2.4 Bedienfehler

Als letzter Performanzparameter werden nun die Bedienfehler der Operateure in der Durchführung der Objektidentifizierungsaufgabe betrachtet. Diese äußern sich beispielsweise in der Anwahl eines falschen Bedienknopfes, oder dem Verfehlen des zu klassifizierenden Objektes beim Eintragen des Klassifikationsergebnisses. Dabei kann es vorkommen, dass in der Bearbeitung einer Aufgabe unter Umständen mehrere Bedienfehler auftreten, so beispielsweise wenn die Versuchsperson während der Klassifizierung mehrfach das zu klassifizierende Objekt verfehlt.

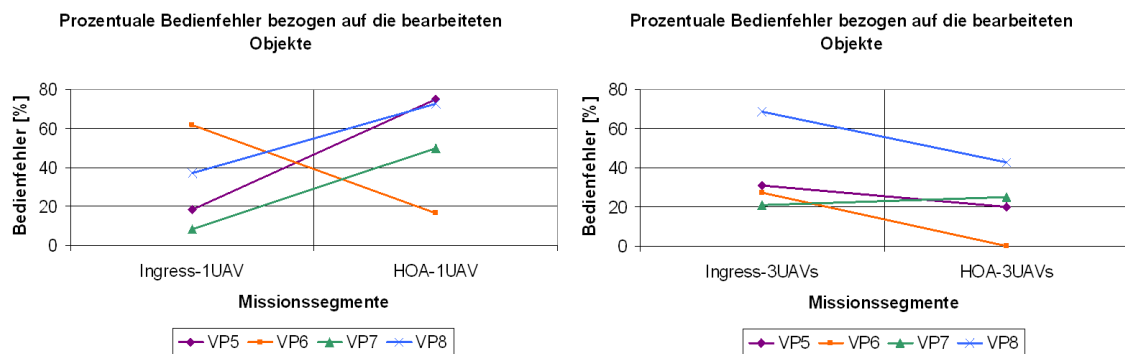


Abbildung 6.11: Relative Häufigkeit der Bedienfehler der Versuchspersonen im Rahmen durchgeführter Objektklassifikationen betrachtet über die Missionssegmente Ingress und HOA, sowie über die Führung von einem (links) bzw. drei UAVs (rechts)

Charakteristisch für Bedienfehler ist, dass es sich hierbei um Fehler handelt, die unmittelbar von den Versuchspersonen wieder korrigiert werden und daher keinen Einfluss auf die übergeordnete Objektidentifizierung besitzen. Meist ist hierfür die Ursache mangelnde Übung in der Touchscreen-Bedienung. Ihre Auswirkung spiegelt sich maximal in einer verlängerten Objektidentifizierungszeit wider.

Abbildung 6.11 zeigt die relative Häufigkeit solcher Bedienfehler der Versuchspersonen bezogen auf die Anzahl durchgeführter Klassifikationen für die Missionssegmente Ingress und HOA für die Führung von einem (Abbildung 6.11, links) und drei UAVs (Abbildung 6.11, rechts).

Es zeigt sich, dass die Bedienfehler der Versuchspersonen (VP5, VP7, VP8) in der Führung von einem UAV zwischen *Ingress* und *HOA* um durchschnittlich ca. 45% ansteigen. Videoanalysen belegen, dass eine wesentliche Ursache für das Ansteigen in einer geringeren Sorgfalt der Bearbeitung der Objekte liegt. Diese spiegelt sich in wiederholten ungenauen Klassifizierungsversuchen, sowie in einer unachtsamen falschen Anwahl von Funktionalitäten wider. Die auffallende Ausnahme bildet hier VP6. Hier ist eine Reduzierung der Bedienfehler zwischen *Ingress* und *HOA* von ca. 45% zu beobachten. Im Gegensatz zu den anderen Versuchspersonen charakterisiert sich VP6 dahingehend, dass sie die wenigsten Objekte bearbeitet (vgl. Abbildung 6.7) hat. Die geringere Anzahl bearbeiteter Objekte (vgl. Abbildung 6.12), sowie die von VP6 deutlich höheren Zeiten für die Durchführung der Objektidentifizierung im Bereich der HOA (vgl. Abbildung 6.9) resultieren letztlich in der deutlich geringeren Bedienfehlerrate.

1UAV	N_{Ingress}	Bedienfehler Ingress	N_{HOA}	Bedienfehler HOA
VP5	22	4	8	6
VP6	21	13	6	1
VP7	24	2	10	5
VP8	27	10	11	8

3UAVs	N_{Ingress}	Bedienfehler Ingress	N_{HOA}	Bedienfehler HOA
VP5	13	4	5	1
VP6	11	3	4	0
VP7	19	4	8	2
VP8	19	13	7	3

Abbildung 6.12: Anzahl durchgeführter Objektklassifikationen (N) und dabei auftretende Bedienfehler in den Missionssegmenten Ingress und HOA in der Führung von einem und drei UAVs

In der Führung von drei UAVs hingegen relativiert sich das Verhältnis der Bedienfehler zwischen *Ingress* und *HOA*. Im Gegensatz zur Führung mit einem UAV reduzieren sich nun die Bedienfehler von VP5, VP6 und VP8 um durchschnittlich ca. 20%. Annähernd konstant hingegen bleibt die Bedienfehlerrate von VP7.

Obleich die Bedienfehlerrate prozentual zu der Anzahl der bearbeiteten Objekte betrachtet wird, spielt hier die Anzahl der von den Versuchspersonen bearbeiteten Objekte eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Da diese in der Führung von drei UAVs in der HOA deutlich reduziert ist (vgl. Abbildung 6.7), sinkt die zeitliche Kritikalität in der Bearbeitung der Objekte. Dies scheint einen entsprechenden Einfluss auf die Bedienfehlerrate der Versuchspersonen zu haben.

6.3 Beobachtete Änderungen im Verhalten der Versuchspersonen

Offensichtlich resultiert die durchgeführte Belastungssteigerung weder in einem deutlichen Beanspruchungsanstieg der Versuchspersonen, noch ist ein ausgeprägter Einbruch in ihrer Leistung zu verzeichnen. Es stellt sich folglich die Frage, ob die beobachtete nur geringfügige Änderungen von Beanspruchung und Leistung in Zusammenhang mit einer Adaption der Versuchspersonen an die vorherrschende Belastungs- und Beanspruchungssituation stehen (vgl. Kapitel 4). Eine detaillierte Analyse des Operateurverhaltens zeigt, dass die Versuchspersonen in den hier betrachteten Missionsdurchführungen auf verschiedene *load-shedding Strategien* zurückgreifen, um Überforderungssituationen und damit verbundene Performanzverluste zu vermeiden.

Hierbei ließen sich im Wesentlichen folgende Strategien anhand der Detailanalyse der Videoprotokolle und anderer Datenaufzeichnungen bezogen auf die Indikatoraufgabe identifizieren [Schulte und Donath, 2011]:

1. *Proaktive Aufgabenreduktion*. Sie bezeichnet eine eigeninitiativ durchgeführte Belastungsreduktion, in diesem Fall eine Reduzierung der Anzahl der zu führenden UAVs von ursprünglich drei auf ein UAV mit dem Ziel möglichen Kapazitätsengpässen vorzubeugen.
2. *Weniger exakte Aufgabenausführung*. Sie ist charakterisiert durch eine bewusste Inkaufnahme von mehrdeutigen Sensorinformationen als Grundlage für eine Klassifikationsentscheidung.
3. *Weglassen von Teilaufgaben*. Hier werden erforderliche Bedienschritte für das Bearbeiten der Teilaufgaben entsprechend eingespart.
4. *Vollständiges Unterlassen einer Aufgabe*. Dabei werden vermeintlich weniger wichtige Aufgaben, in diesem Fall die Suche nach Objekten und ihre Identifizierung, über eine ganze Missionsphase vernachlässigt.

5. *Gezielte Verzögerung der Aufgabendurchführung.* Sie bezeichnet eine beabsichtigte, temporäre Unterbrechung der Aufgabendurchführung in zeitlich kritischen Situationen und die Wiederaufnahme dieser Aufgabe in Situationen geringerer Beanspruchung.

Einige dieser Strategien wurden nur ein einziges Mal von einer einzelnen Versuchsperson angewendet. Andere Strategien hingegen lassen sich bei verschiedenen Versuchspersonen, sowie in unterschiedlichen Missionssegmenten und Konfigurationen beobachten. Die nachfolgende Tabelle 6.2 zeigt eine Übersicht über die Anwendung der hier beobachteten Strategien durch die jeweilige Versuchsperson, einschließlich der Informationen in welcher Konfiguration und in welchem Missionssegment sich diese Strategien beobachten ließen.

Load-shedding Strategie	VP5	VP6	VP7	VP8
Proaktive Aufgabenreduktion	3UAV, Ingress			
Weniger exakte Aufgabendurchführung				1UAV, Ingress 3UAV, HOA
Weglassen von Teilaufgaben	1UAV, HOA 3UAV, HOA	1UAV, Ingress 3UAV, HOA		1UAV, Ingress 3UAV, HOA
Vollständiges Unterlassen der Aufgabe	1UAV, Egress 3UAV, Egress	1UAV, Egress 3UAV, Egress	1UAV, Egress 3UAV, Egress	1UAV, Egress 3UAV, Egress
Gezielte Verzögerung der Aufgabendurchführung		1UAV, HOA		

Tabelle 6.2: Beobachtete load-shedding Strategien der Versuchspersonen, unterteilt in die betrachteten Konfigurationen, sowie die Missionsphasen

Im Folgenden werden nun die im Rahmen der Versuchsdurchführung beobachteten Verhaltensänderungen bezogen auf die Durchführung der Indikatortask genauer analysiert. Dabei werden identifizierte Strategien zunächst anhand ihrer Einzelbeobachtungen qualitativ beschrieben und dann mit Hilfe quantitativer Belege nachgewiesen.

6.3.1 Proaktive Aufgabenreduktion

Die übergeordnete Aufgabe der Versuchspersonen ist es, die Hubschraubertrasse, unterteilt in die Missionssegmente *Ingress*, *HOA* und *Egress* unter Verwendung der abhängig von der Konfiguration zur Verfügung stehenden UAVs (ein bzw. drei UAVs) zeitnah aufzuklären. Diese Aufklärungsaufgabe besteht im Wesentlichen aus der Auswertung (Suche, Identifizierung und Klassifizierung) von Objekten in den von den UAVs bereitgestellten Sensorbildern. In der Konfiguration mit drei UAVs muss die Versuchsperson hierfür ihre Aufmerksamkeit abwechselnd den Sensorbildern der einzelnen UAVs zuwenden, um diese nach möglichen Objekten (Hotspots) abzusuchen. Im Falle der hier beobachteten Strategie zeigt sich, dass die betrachtete Versuchsperson (VP5) dieser Anforderung zu Beginn der Mission, einem Segment, das sich von der FOB (dem Startpunkt des HC und der UAVs) bis hin zum *Ingress*-Korridor in das feindliche Gebiet erstreckt, ohne Einschränkungen nachkommt. Mit Einflug des ersten UAV (UAV1) in den Korridor ändert sich jedoch das Verhalten der Versuchsperson unvermittelt. So wendet die Versuchsperson ab diesem Zeitpunkt seine Aufmerksamkeit ausschließlich UAV1 zu. Den beiden verbleibenden UAVs (UAV2, UAV3), ebenso wie ihren Sensorbildern, hingegen widmet sie keinerlei Aufmerksamkeit mehr.

Schematisch ist dieses Vorgehen in Abbildung 6.13 (links) dargestellt. Abbildung 6.13 (rechts) stellt die Aufmerksamkeitszuwendung des Operators gemessen in Fixationsverweilzeiten auf Sensorbildern der einzelnen UAVs dar. Deutlich zeigt sich hier zunächst die abwechselnde Aufmerksamkeitszuweisung des Operators zu den einzelnen UAVs bzw. deren Bodenbildern vor Einflug in

den Übergangskorridor in das feindliche Gebiet. Der Übergangskorridor ist in dieser Abbildung als gestrichelte Linie visualisiert. Mit Einflug des ersten UAVs in den Korridor ändern sich die Fixationsverteilung der Versuchsperson und damit ihre Aufmerksamkeitsverteilung zu den einzelnen UAVs bzw. ihren Sensorbildern. Es zeigt sich, dass von diesem Zeitpunkt die Aufmerksamkeit der Versuchsperson ausschließlich UAV1 zugeteilt wird. Die Fixationszeiten auf UAV2 und UAV3 bzw. ihren Sensorbildern reduzieren sich auf Null.

Durch Anwenden dieser Strategie, die eine Vernachlässigung der beiden anderen UAVs vorsieht, reduziert der Operateur proaktiv seine Aufgabenlast mit dem Ziel das Erreichen eigener Kapazitätsgrenzen, hier bezüglich seiner Aufmerksamkeitsressourcen, zu vermeiden und damit das Aufkommen einer möglichen Überforderungssituation zu umgehen. Dabei wird von der Versuchsperson die Annahme getroffen, dass der von dem UAV1 aufgeklärte Bereich für den nachfolgenden Hubschrauber ausreichend breit ist, um eine Bedrohungen des Hubschraubers und damit der UAV-Führungsplattform zu vermeiden.

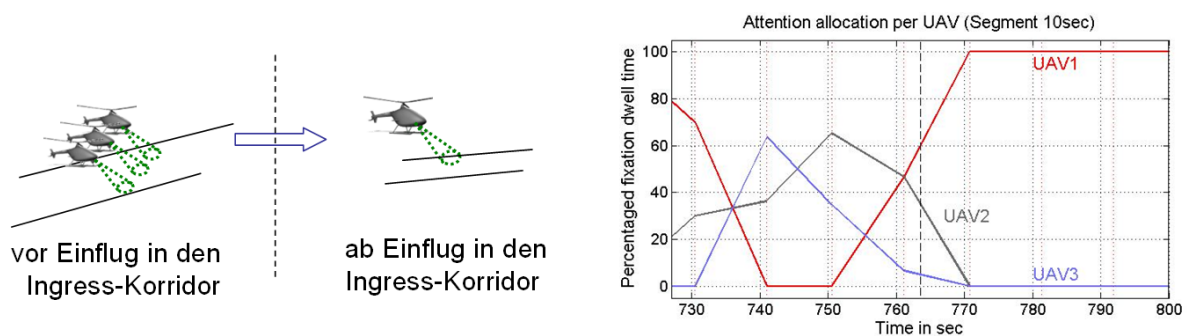


Abbildung 6.13: Load-Shedding durch proaktive Aufgabenreduktion verdeutlicht über die Aufmerksamkeitszuteilung von VP5 zu den zu führenden und zu überwachenden UAVs

6.3.2 Weniger exakte Aufgabendurchführung

Diese Strategie kommt ausschließlich in der Teilaufgabe „*classify*“ zum Tragen. In dieser Teilaufgabe wird unter Verwendung des vom UAV übermittelten Live-Videostreams ein zuvor detektiertes und markiertes Objekt klassifiziert.

Für eine eindeutige Objektklassifikation wird die maximal verfügbare Zoomstufe der UAV-Kamera benötigt. Ferner sollte infolge Sensorlimitierungen eine Distanz von einer nautischen Meile zwischen aufzuklarendem Objekt und UAV nicht überschritten werden. Ist die Distanz zwischen Objekt und UAV größer als dieser Schwellwert, ist es der Versuchsperson trotz Verwendung der maximalen Zoomstufe nicht möglich das Objekt eindeutig zu klassifizieren. In diesem Fall muss die Versuchsperson für eine eindeutige Klassifikation zunächst entsprechende Umplanungsvorgänge des UAV-Flugweges initiieren, um die Distanz zwischen UAV und Objekt zu reduzieren.

Abbildung 6.14 zeigt die Durchführung der Objektklassifikation unter „*normalen*“ Bedingungen, wie auch unter Verwendung der hier betrachteten *load-shedding* Strategie. Beide Abbildungen zeigen das empfangene Sensorbild (links), den gewählten Zoom-Faktor für die Darstellung des Objektes (Mitte) und die Distanz zwischen Objekt und UAV (rechts). In beiden Fällen wird für die Klassifizierung des Objektes die maximal verfügbare Zoomstufe verwendet. Im Falle der *load-shedding* Strategie zeigt sich, dass die kritische Distanz für eine eindeutige Erkennung überschritten wird. Ungeachtet der ungenauen Objektdarstellung in Abbildung 6.14 (unten) unterlassen die Versuchspersonen bei Anwendung dieser Strategie die erforderlichen Umplanungsvorgänge für eine eindeutige Objektklassifikation. Vielmehr verwenden die Versuchspersonen in diesen Fällen diese unklare Objektdarstellung als Klassifikationsgrundlage und erhöhen damit das Risiko einer Fehlklassifikation, die unweigerlich eine Erhöhung des Missionsrisikos zur Folge hat.

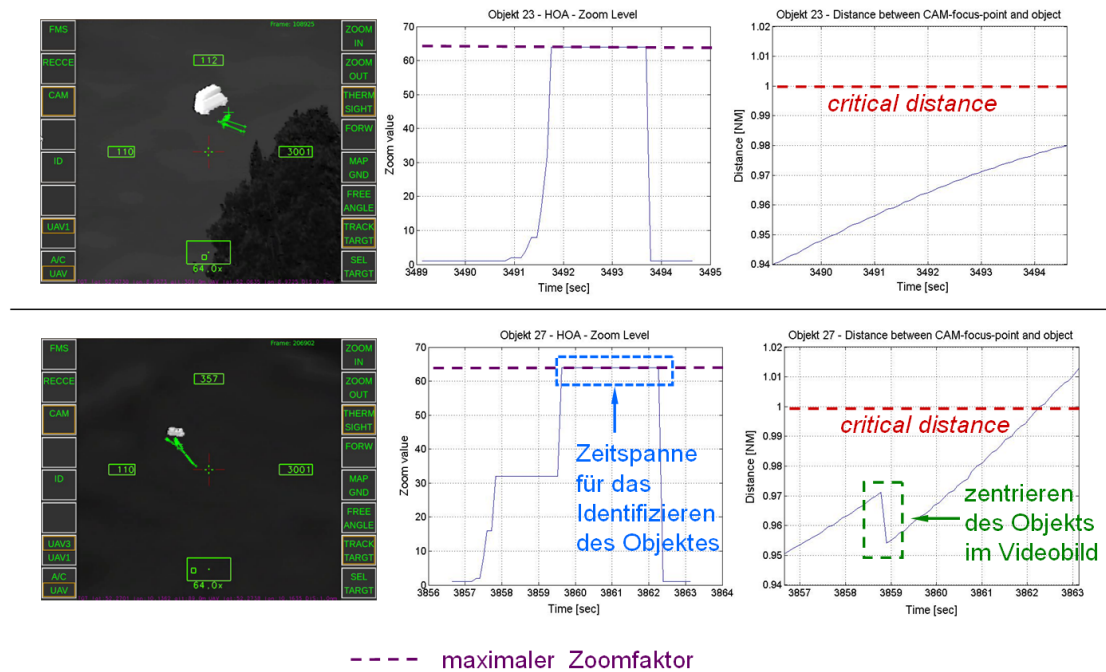


Abbildung 6.14: Objektklassifikation unter normalen Bedingungen (oben) und modifiziert als Folge der angewendeten selbstadaptiven Strategie (unten)

6.3.3 Vernachlässigen von Teilaufgaben

Für gewöhnlich besteht die Objektidentifizierung aus den drei Teilaufgaben „*recognise and tag*“, „*classify*“ und „*insert result*“ (Kapitel 4). In beanspruchenden und oftmals zeitkritischen Situationen, wie beispielsweise bei der Aufklärung von Landezonen innerhalb der HOA, beginnen Versuchspersonen oftmals als Folge von Zeitnot, Teilaufgaben der durchzuführenden Objektidentifizierungsaufgabe zu unterlassen.

Dieses Weglassen kann sich auf eine, bzw. mehrere Teilaufgaben der Objektidentifizierung erstrecken. Konkret bedeutet dies das Weglassen des Eintragens eines Klassifikationsergebnisses in das System, sowie gegebenenfalls das Weglassen der Klassifizierung des Objektes. Abbildung 6.15 zeigt schematisch dargestellt die Anwendung dieser Strategie in den beiden hier genannten Kombinationen für die Führung von drei UAVs durch die Versuchsperson VP5. Dargestellt ist hierbei ein Ausschnitt der von der Versuchsperson durchgeführten Objektidentifizierungsaufgaben entlang des Missionsverlaufs. Die Objektidentifizierungsaufgaben wurden für diese Betrachtung in ihre Teilaufgaben aufgeschlüsselt. Vom Operateur bearbeitete Teilaufgaben wurden grün markiert, unterlassene Teilaufgaben hingegen mit einem roten Symbol der leeren Menge gekennzeichnet.

Das Weglassen der Teilaufgabe „*insert result*“ ist für gewöhnlich die Folge einer im Vorfeld begonnen, jedoch fehlgeschlagenen Klassifizierung des Objektes, die durch den Operateur später nicht mehr aufgegriffen wird.

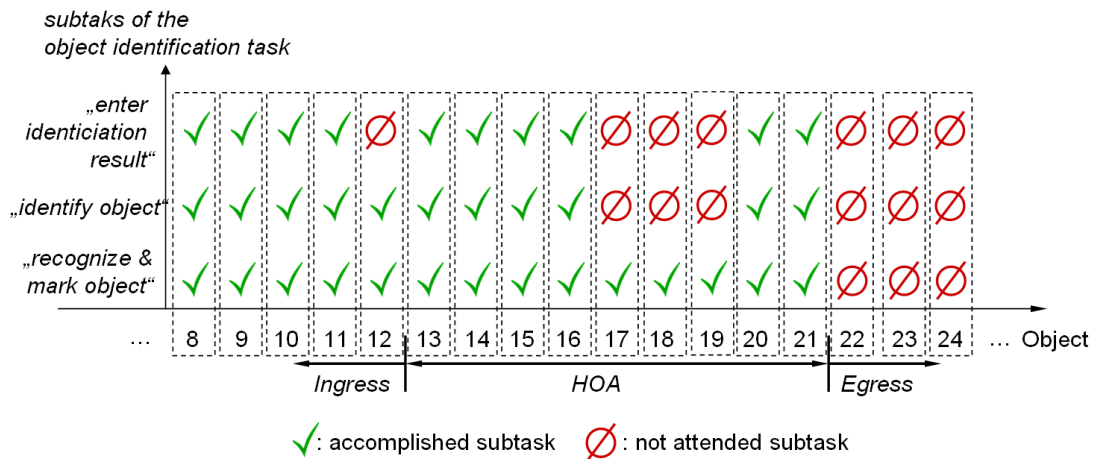


Abbildung 6.15: Weglassen von Teilaufgaben in der Führung von drei UAVs durch VP5

Das vollständige Weglassen des Klassifikationsprozesses, bestehend aus den Teilaufgaben „classify“ und „insert result“, hingegen ist ein Phänomen, das sich wiederholt in zeitkritischen Situationen beobachten lässt. So berichten die Versuchspersonen im Debriefing, dass sie durch das Weglassen von Aufgaben in Überlastsituationen einer Zeitnot entgegenwirken wollten. Exemplarisch ist dieses Vorgehen in (Abbildung 6.16) dargestellt. Diese visualisiert die vom Operateur angewendete *load-shedding* Strategie des Operators (VP5) in der Bearbeitung der Aufgabe 18 und 19 (vgl. Abbildung 6.15). Hierbei markierte die Versuchsperson die Objekte auf der Route zur Landezone lediglich mit einem Fragezeichen. Die nachfolgenden Teilaufgaben „classify“ und „insert result“ wurden gezielt ausgelassen. Gleichzeitig informiert die Versuchsperson sein Teammitglied, den Piloten des Hubschraubers, auf dem Weg zur Landezone beim Vorbeifliegen an diesen Objekten entsprechend aufmerksam zu sein.

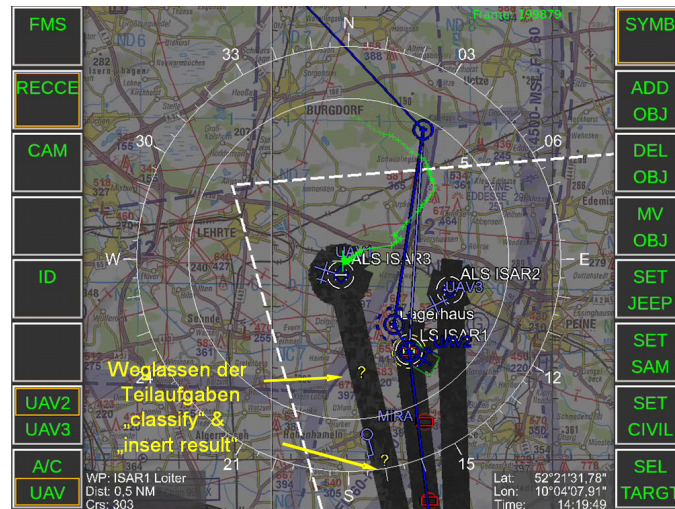


Abbildung 6.16: Weglassen der Teilaufgaben „classify“ und „insert result“ bei der Führung von drei UAVs in der HOA durch VP5

Bei der Anwendung dieser Strategie vernachlässigt die Versuchsperson nicht nur die Vervollständigung der Teilaufgaben, sondern überträgt zudem die Verantwortung für eine sichere Flugdurchführung dem Hubschrauberpiloten. Damit lässt sich diese beobachtete Verhaltensänderung nicht mehr

ausschließlich einer *load-shedding* Strategie zuordnen, sondern kann zudem als *load-sharing* Strategie aufgefasst werden. Diese zeichnet sich durch Abgabe von Aufgaben und damit verbunden Verantwortlichkeiten an andere Teammitglieder aus. Die Vernachlässigung von Teilaufgaben als Adaptionsreaktion an die aktuell vorherrschende Beanspruchungssituation ist eine Strategie, die sich wiederholt bei verschiedenen Versuchspersonen beobachten ließ. Tabelle 6.3 gibt hierzu eine Übersicht über die Häufigkeit der Anwendung dieser Strategie durch die Versuchspersonen bezogen auf die Missionssegmente *Ingress* und *HOA*. Das Missionssegment *Egress* wurde in dieser Auflistung vernachlässigt, da keine Versuchsperson die Aufgabe der Objektidentifizierung auf der Egress-Route durchgeführt hat.

VP	Anzahl UAV	Anzahl Objekte (<i>Ingress</i>)	Anzahl aufgeklärter Objekte (<i>Ingress</i>)	Strategieanwendung (<i>Ingress</i>)	Anzahl Objekte (<i>HOA</i>)	Anzahl aufgeklärter Objekte (<i>HOA</i>)	Strategieanwendung (<i>HOA</i>)
VP5	1UAV	31	23	1	12	8	2
	3UAVs	28	13	1	14	7	3
VP6	1UAV	31	23	1	12	5	1
	3UAVs	28	14	0	14	4	0
VP7	1UAV	31	24	0	12	10	2
	3UAVs	28	19	0	14	8	0
VP8	1UAV	31	25	0	12	12	1
	3UAVs	28	20	1	14	7	1

Tabelle 6.3: Anzahl der Strategieanwendung „Weglassen von Teilaufgaben“ in den Missionssegmenten *Ingress* und *HOA* für die Versuchspersonen und die untersuchten Konfigurationen

6.3.4 Vollständiges Vernachlässigen der Objektidentifizierungsaufgabe

In der Missionsphase *Egress* lässt sich sowohl unabhängig von der betrachteten Versuchsperson, als auch von der untersuchten Konfiguration (ein bzw. drei UAVs) eine nahezu vollständige Vernachlässigung der Suche nach Objekten (Hotspots), sowie die damit verbundene Durchführung der Objektidentifizierung beobachten.

Das *Egress*-Missionssegment ist charakterisiert durch zusätzlich zu den Objekten positionierte, unbekannte SAM-Stellungen. Die Suche und Lokalisierung dieser Bedrohungen stellt für die Operateure eine weitere eingebettete Nebenaufgabe zur Belastungssteigerung dar. Infolge der von den SAM-Stellungen ausgehenden immanenten Bedrohung ist zu erwarten, dass für den Zeitraum beginnend mit dem ersten Radarkontakt bis zur Bestimmung und dem Eintragen der Position in das System, die Nebenaufgabe zur Primäraufgabe wird, die Suche und Identifizierung von Objekten folglich den Rang einer Nebenaufgabe einnimmt und demzufolge nicht bearbeitet wird.

Es zeigt sich jedoch, dass auch in Zeiten, die frei von jeglicher Bedrohung für die UAVs und der Führungsplattform sind, die Suche nach möglichen Hotspots durch die Versuchspersonen kaum mehr aufgenommen wird.

Quantitativ lässt sich dieses Verhalten neben der Videoprotokollanalyse in der Verwendung verschiedener Zoomstufen in den einzelnen Missionsphasen durch die Versuchspersonen nachweisen. So stellen die von der Versuchsperson verwendeten Zoomstufen einen Indikator für die Durchführung der Objektsuche und -identifizierung dar. Für eine klare Erkennung der nur pixelgroßen Hotspots in den Bodenkachelbildern bedarf es einer Zoomstufe von 0,2 oder weniger. Es zeigt sich jedoch, dass die erforderlichen Zoomwerte für die Erkennung von HotSpots ($\leq 0,2$) nur in einem sehr geringen Teil der Zeit verwendet wird. Beispielhaft ist dieses Verhalten der markanten Verwendung verschiedener Zoomstufen in den unterschiedlichen Missionssegmenten für VP8 in der Führung von drei UAVs in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

	INGRESS [%]	HOA [%]	EGRESS [%] BEDROHUNGSZEIT	EGRESS [%] BEDROHUNGSFREI
Zeit in den Missionssegmenten	0:27:36 [h]	0:13:24 [h]	0:07:56 [h]	0:25:15 [h]
ZOOMSTUFEN				
0, 1	13,97%	21,45%	3,69%	4,09%
0, 2	47,06%	27,06%	0,86%	1,21%
0, 5	35,93%	30,59%	12,99%	19,57%
> 0, 5	1,21%	20,89%	82,45%	74,92%

Tabelle 6.4: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Zoomstufen am Beispiel VP8 betrachtet über den Missionsverlauf in der Führung von drei UAVs

Hierbei wurde für das *Egress*-Segment die prozentuale Verteilung der verschiedenen Zoomstufen sowohl für die Zeit mit akut vorherrschender Bedrohung, als auch die vollständig bedrohungsfreien Zeiten ermittelt. Als bedrohungsfreie Zeit gilt, wenn weder die Führungsplattform (der Hubschrauber) noch eines der UAV einer Bedrohung durch eine SAM-Stellung ausgesetzt ist. Dabei zeigt sich, dass auch nach Beendigung einer Bedrohung die Suche nach Objekten kaum mehr durch die Versuchsperson aufgegriffen wird. Lediglich in etwa 5% der Zeit wird die Suche nach möglichen Objekten wieder aufgenommen. Die verbleibende Zeit jedoch verwendet die Versuchsperson Zoomstufen von 0,5 und größer, die keine Suche nach Objekten mehr zulässt, jedoch einen besseren Überblick über Radarpeilungen ermöglicht.

Dieses Verhalten findet sich in ähnlicher Ausprägung auch bei den anderen Versuchspersonen. Mit diesem Verhalten nehmen die Versuchspersonen ein erhöhtes Risiko eines möglichen Feindbeschusses durch unaufgeklärte, feindliche Objekte entlang ihres Flugweges bewusst in Kauf.

6.3.5 Gezielte Verzögerung der Aufgabenvervollständigung

Aufgabe der Versuchspersonen in der *HOA* ist es, unter Verwendung der zur Verfügung stehenden UAVs möglichst schnell die verschiedenen Landezonen (geplante Landezone (LS1), Ausweichlandezone1 (ALS2), Ausweichlandezone2 (ALS3)) (vgl. Abbildung 6.17) aufzuklären, um mit dem Hubschrauber eine sichere Landezone anfliegen zu können. Infolge des nur geringen zeitlichen Abstandes zwischen UAVs und Hubschrauber (5-7 Minuten) und der örtlichen Dislozierung der verschiedenen Landeplätze bedingt dies Zeitdruck für die Versuchspersonen. Verstärkt wird dieser Effekt in der Führung von nur einem UAV, die lediglich eine sequentielle Aufklärung der verschiedenen Landeplätze erlaubt. Um eine Landezone als sicher oder bedroht einzustufen zu können, ist es für die Versuchspersonen erforderlich, im Umfeld der Landezonen befindliche Objekte zu finden und zu klassifizieren. Wird ein feindliches Objekt innerhalb eines Sicherheitsbereiches einer Landezone entdeckt, ist diese als bedroht („hot“) und damit ungeeignet für den Hubschrauber einzustufen. Abbildung 6.17 veranschaulicht das Vorgehen von VP6 in der Aufklärung vorgeplanter Landezonen in der Führung von einem UAV. Zu erkennen ist hierbei das sequentielle Vorgehen beginnend bei LS1 zu ALS2 und letztlich zu ALS3.

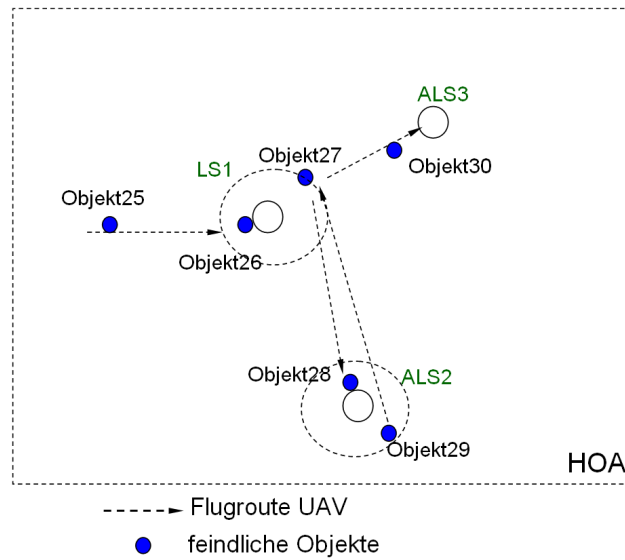


Abbildung 6.17: Landezonenaufklärung unter Verwendung eines UAV (VP6)

Die Bearbeitung der dabei nacheinander von VP6 entdeckten Objekte, sowie die Durchführung der einzelnen Objektidentifizierungen findet sich hierzu in Abbildung 6.18 dargestellt. Dabei wird jede Objektidentifizierung anhand ihrer durchgeführten Teilaufgaben aufgeschlüsselt.

Die Objekte 25, 26, und 28 spiegeln dabei das normative, zügige Vorgehen in der Objektidentifizierung durch die Versuchsperson wieder. Dieses ist charakterisiert durch die zeitnah aufeinander folgende Bearbeitung der Teilaufgaben beginnend mit dem Erkennen und Markieren des Objektes, gefolgt von dem Klassifizieren des Objektes unter Verwendung des Live-Videostreams und dem abschließenden Eintragen des Klassifikationsergebnisses in das System.

Da die Objekte 25 und 26 durch die Versuchsperson als feindlich identifiziert wurden, wird die örtlich nahegelegene Landezone LS1 ebenfalls als bedroht eingestuft. Bei Eintragen des Ergebnisses in das System entdeckt die Versuchsperson Objekt 27. Diesem widmet sie mehrere aufeinander folgende Fixationen, gefolgt von ebenfalls mehreren Fixationen auf dem Bedienknopf für die Markierung des Objektes. Damit ist die Teilaufgabe Erkennen des Objektes erfüllt, die Bearbeitung der Identifizierung von Objekt 27 gilt damit als begonnen.

Durch seine Lage zu der bereits als bedroht eingestuften Landezone (LS1) unterbricht die Versuchsperson die weitere Bearbeitung des Objektes und wendet sich infolge der zeitlichen Kritikalität zunächst der Aufklärung der Route zu Ausweichlandezone ALS2 zu. Dabei trifft die Versuchsperson auf Objekt 28, das normativ bearbeitet wird. Da es sich auch hierbei um ein feindliches Objekt handelt, wird auch die zweite Landezone (ALS2) als bedroht eingestuft. Infolge dessen widmet sich die Versuchsperson umgehend dem Rückflug und damit der Aufklärung der noch verbleibenden Landezone ALS3. Dabei entdeckt sie Objekt 29. Dieses ist infolge der bereits als bedroht klassifizierten Landezone ALS2 nicht weiter von Interesse und wird lediglich als ein Objekt in der Karte markiert. Stattdessen greift nun die Versuchsperson die anfänglich zurückgestellte Identifizierung von Objekt 27 erneut auf und vervollständigt die noch unerledigten Teilaufgaben der Klassifizierung und das Eintragen des Ergebnisses in das System.

Diese Strategie zeigt exemplarisch ein für zeitkritische Situationen typisch menschliches Verhalten, in dem die Bearbeitung zunächst unwichtigerer Aufgaben bewusst und gezielt zurückgestellt und die Durchführung anderer, in diesen Situationen relevanter Aufgaben entsprechend priorisiert wird. Quantitativ lässt sich dieses Verhalten im Falle der hier betrachteten Indikatortaufgabe deutlich an der benötigten Zeit für die Durchführung der Objektidentifizierungsaufgabe, sowie der zeitlichen Überschneidung mit anderen in dieser Zeit erfolgten Objektidentifizierungen erkennen.

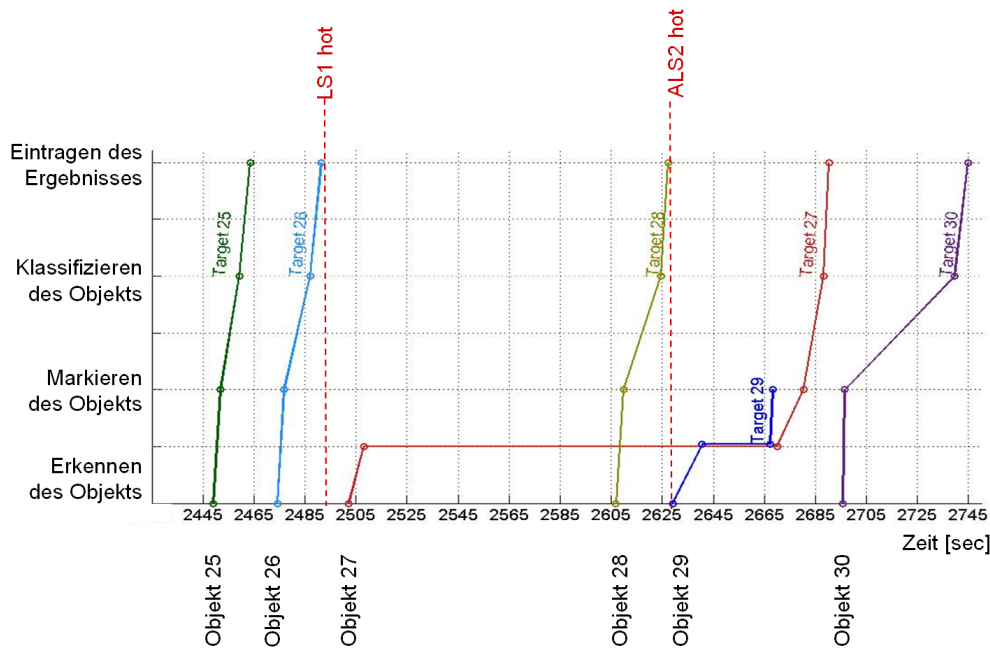


Abbildung 6.18: Durchführung der Objektidentifizierungsaufgaben in der Führung von einem UAV für VP6)

Resümee:

Trotz massiver Steigerung der Aufgabenlast, hervorgerufen durch Nebenaufgaben, zeitliche Randbedingungen und der Anzahl der zu führenden UAVs, konnte **bei keiner der Versuchspersonen eine deutliche Erhöhung in der subjektiv empfundenen Beanspruchung** registriert werden. Bestenfalls handelt es sich hierbei um einen leicht ansteigenden Trend, der am deutlichsten in dem Vergleich der Führung von einem bzw. drei UAVs zu erkennen ist. Die Ergebnisse des hierzu verwendeten Fragebogenverfahrens **NASA-TLX** lassen folglich **kaum einen Rückschluss auf Überforderung** einer Versuchsperson zu. Ferner zeigt sich über den Missionsverlauf oder über die Führung von einem bzw. drei UAVs **kaum ein Absinken in der Leistung** der Versuchspersonen. So weisen die Versuchspersonen lediglich einen geringen Trend zu Fehlklassifikationen auf. Auch die **erforderliche Zeit für die Objektidentifizierung bleibt weitestgehend konstant**. Jedoch sinkt die Anzahl gefundener und damit klassifizierter Objekte in der Führung von drei UAVs. Diesem sind sich die Versuchspersonen jedoch nicht bewusst und können demzufolge nicht aktiv entgegenwirken. Während **Beanspruchung und Leistung** der Versuchspersonen **weitestgehend konstant** bleiben, zeigt sich eine **Änderung im Verhalten** der Operateure. Hier offenbart eine detaillierte Betrachtung des Verhaltens in der Durchführung der Indikatortaufgabe die zum Teil unterschiedlichen *load-shedding* Strategien der Versuchspersonen. Die dabei vorgenommene Adaption der Versuchspersonen an die vorherrschenden Belastungs- und Beanspruchungsbedingung äußerte sich in dem Weglassen von Teil- bzw. ganzen Aufgabensträngen, dem gezielten zeitlichen Verzögern in der Bearbeitung der Indikatortaufgabe, der proaktiven Belastungsreduktion, sowie dem zeitlich effizienteren, jedoch weniger exakten Ausführen der Objektidentifizierungsaufgabe. **Dieses Vorgehen ermöglichte es den Versuchspersonen das Erreichen einer subjektiven Überforderungssituation und damit verbundenen weiteren Leistungseinbrüchen zu vermeiden**. Auf diese Weise gelingt es, die **subjektiv empfundene und auch die objektive Leistung auf einem „Mikro-Level“** auf hohem Niveau zu halten. Natürlich kommt es **durch das load-shedding zu Leistungsverlusten auf dem „Makro-Level“**, also etwa durch das Weglassen ganzer Aufgabenstränge. Insgesamt kann also festgehalten werden: Die **Versuchspersonen bearbeiten unter hoher Last die Aufgaben, die noch wahrgenommen werden mit hoher Güte, aber es werden eben nicht mehr alle Aufgaben wahrgenommen!**

Kapitel 7

Modellierung

Die Unterstützung eines Operators in Situationen hoher Beanspruchung sowie in Situationen in denen er seine Aufmerksamkeit nicht der gegenwärtig dringlichsten Aufgabe zuwendet erfordert die Fähigkeit des Assistenzsystems, sowohl die aktuell vom Operator bearbeitete Aufgabe, als auch eine mögliche Überforderung maschinell erkennen zu können.

In den vorausgehenden Kapiteln (vgl. Kapitel 3, Kapitel 4) wurde gezeigt, dass Operatorverhalten prinzipiell als Indikator für die Umsetzung beider Anforderungen verwendet werden kann. So ist es möglich, durch Beobachtung von Operatorverhalten Aufgabensituationen und drohende Überforderungen des Operators zu schließen. Um diese bis dato ausschließlich menschliche Fähigkeit einem Assistenzsystem zu verleihen, werden geschlossene Rechnermodelle benötigt, die das aufgabenspezifische Verhalten des Operators, wie auch seine beanspruchungsbedingten Änderungen, abbilden.

Für die Umsetzung dieser Modelle wird ein Ansatz gewählt, der sich in ähnlicher Form z.B. in der Spracherkennung findet. Kernelement solcher Spracherkenner stellt ein Inventar an so genannten Phonemmodellen¹ dar. Jedes dieser Phonemmodelle wird durch ein entsprechendes Hidden Markov Modell (HMM) repräsentiert [Beulen u. a., 1996]. Diese werden mit Hilfe von Sprachdatensätzen a-priori trainiert. Vereinfacht betrachtet erfolgt die Erkennung von Wörtern durch die Sequenz der am wahrscheinlichsten erkannten Phonemmodelle für ein Sprachsignal.

Übertragen auf die Verhaltensmodellierung wird hier der Ansatz verfolgt das Verhalten von Operateuren in vergleichsweise kleine Untereinheiten zu unterteilen und zu modellieren. Als Untereinheiten wird hier das Verhalten in einzelnen Aufgabensituationen betrachtet. Ziel ist es durch Beobachtung des Operatorverhaltens auf die dafür wahrscheinlichste Aufgabensituation zu schließen. Da das Verhalten von Operateuren sowohl von der Aufgabensituation, der Erfahrung des Operators sowie seiner Beanspruchung abhängig ist (vgl. Kapitel 4), sind spezifische Aufgabenmodelle individuell für jeden Operator, sowie für die unterschiedlichen Beanspruchungssituationen (normal bzw. kritisch beansprucht) zu erstellen.

Im Folgenden wird diese Modellierung des Operatorverhaltens exemplarisch für die Betrachtung einer Versuchsperson in einer spezifischen Aufgaben- und Beanspruchungssituation unter **Verwendung eines maschinellen Lernverfahrens** durchgeführt.

Um die Anwendbarkeit dieses Ansatzes für die Umsetzung der zweiten Grundforderung an Assistenzsysteme (Kapitel 2) zu demonstrieren, ist es wünschenswert, das Operatorverhalten in einer bevorstehenden Überforderungssituation, charakterisiert durch die Anwendung selbstadaptiver Strategien zu modellieren. Da sich diese Strategien in den Experimenten jedoch nur vereinzelt beobachten ließen (vgl. Abbildung 7.1), ist der so empirisch gewonnene Datensatz nicht umfangreich genug, um unter Verwendung eines maschinellen Lernverfahrens ein entsprechendes Modell erstellen zu können.

Die Modellierung des Operatorverhaltens erfolgt daher zunächst anhand des Nominalverhaltens

¹Phoneme bilden die Sprache in kleinsten, bedeutungsunterscheidenden Einheiten ab [Wendemuth, 2004].

der Indikatoraufgabe. Hierbei sollen die bisher gewonnen Beobachtungen über die Durchführung der Indikatoraufgabe (vgl. Kapitel 4) in der Modellierung verwendet werden.

7.1 Charakteristika beobachteter Verhaltenssequenzen

In diesem Abschnitt sollen die Charakteristika der im Experiment beobachteten Verhaltenssequenzen im Hinblick auf die Auswahl eines geeigneten maschinellen Lernverfahrens untersucht werden. Bei der Analyse der Verhaltenssequenzen zeigen sich die folgenden Eigenschaften:

- *Sequentielle Ausprägung:* Das Verhalten bei der Aufgabenbearbeitung setzt sich aus beobachtbaren, diskreten, sequentiellen Einzelaktionen zusammen. Wird ausschließlich das manuelle Verhalten betrachtet, äußert sich dieses in aufeinander folgenden Bedienaktionen (z.B. Anwählen eines Displaymodes, Markieren des Objektes, Ausrichten der Kamera auf ein Objekt). Genauso handelt es sich beim visuellen Verhalten um eine zeitliche Abfolge von Blickfixationen bestimmter Objekte auf den Displays. Diese beiden Prozesse (manuelle und visuelle Interaktion) laufen parallel zueinander ab, sind aber immer wieder gekoppelt. So ist beispielsweise die visuelle Aufmerksamkeitszuwendung zu einem Objekt häufig gefolgt von der Anwahl/Betätigung dieses Objektes durch den Operateur. Abbildung 7.1 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs an manuellen und visuellen (Fixationen) Interaktionen für die Bearbeitung der Teilaufgabe „Erkennen und Markieren“ eines Objektes durch Versuchsperson VP4.

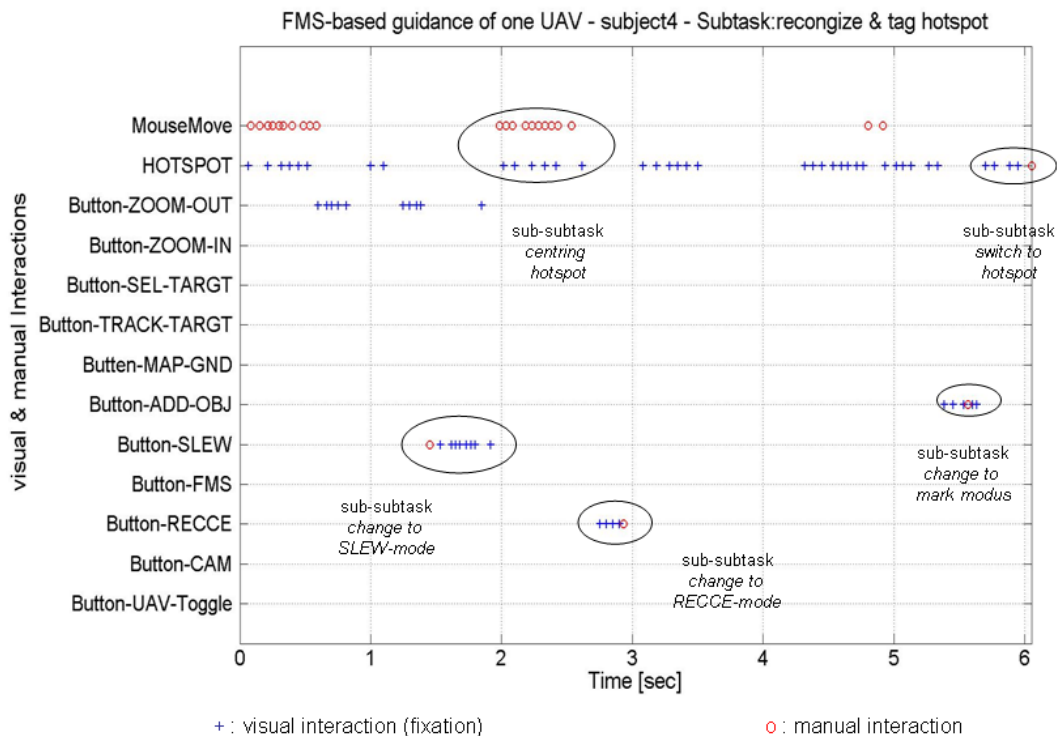


Abbildung 7.1: Sequentielle Ausprägung von Operateurverhalten

- *Mehrdeutiger Zusammenhang:* Erfolgt eine Betrachtung des aufgabenspezifischen Operateurverhaltens auf Basis der in Kapitel 4 vorgestellten Teilaufgaben recognise & tag, classify und insert result, zeigt sich, dass sich die vom Operateur in der Bearbeitung der Aufgabe

getätigten Aktionen oftmals mehreren Teilaufgaben zuordnen lassen. Dieser mehrdeutige Zusammenhang zwischen Interaktionen und Teilaufgaben ist in Tabelle 7.1 für die manuellen Interaktionen zusammengefasst. Die Identifikation der jeweilig bearbeiteten Teilaufgabe ist das Resultat einer Interpretation durch den Domänenexperten.

Teilaufgabe	<i>recognise & tag</i>	<i>classify</i>	<i>insert result</i>
manuelle Interaktion	Click Hotspot Add Object Select Target Move Map Zoom In Zoom Out Others	Center Object CAM-Button RECCE-Button Track Target Zoom In Zoom Out Map Ground Others	Click Hotspot Add Object RECCE-Button Move Map Zoom In Zoom Out Map Ground Classification CAM-Button Others

Tabelle 7.1: Zusammenhang der beobachtbaren Operateurinteraktionen in den einzelnen Teilaufgaben am Beispiel der Objektidentifizierungsaufgabe

- *Variabilität in Anzahl und Art:* Die experimentell beobachteten Interaktionssequenzen variieren in der Anzahl und Ausprägung (Art) der für die Durchführung der Indikatoraufgabe benötigten Einzelaktionen. Hintergrund dieser Variabilität ist das situationsangepasste Verhalten der Operateure. Dieses äußert sich unter anderem in wiederholten Objektzentrierungen, -markierungen, mehrfachen Heranzoomen des Objektes um eine bessere Identifizierung und Klassifikation von Objekten zu erwirken, kann sich aber ebenso in Fehlaktionen gefolgt von unmittelbaren Korrekturaktionen widerspiegeln. Abbildung 7.2 zeigt diese Variation in der Anzahl durchgeführter Aktionen exemplarisch für die Bearbeitung der Indikatoraufgabe in der Führung von einem UAV durch VP5.

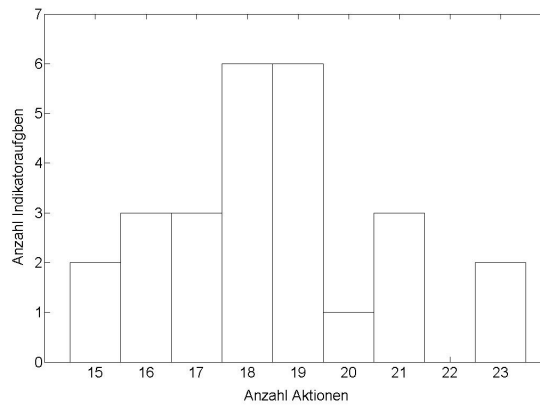


Abbildung 7.2: Häufigkeitsanalyse der Kettenlängen manueller Interaktionssequenzen bei der normativen Bearbeitung der Indikatoraufgabe (VP5-1UAV)

Einen detaillierten Überblick über die im Rahmen der Experimente beobachtete Variation in der Durchführung der Indikatoraufgabe bietet Tabelle 7.2. Sie umfasst die Anzahl der durchgeführten Objektidentifizierungsaufgaben N_{OI} , die Anzahl der darin enthalten manuellen Einzelaktionen $N_{Akt.}$, die minimale und maximale Anzahl verwendeter Aktionen in der Durchführung der Indikatoraufgabe (MIN, MAX), das arithmetische Mittel μ , sowie die Standardabweichung $\sigma(x)$ bezogen auf die Anzahl benötigter Aktionen.

VPN	Konfig	N_{OI}	$N_{Akt.}$	MIN	MAX	μ	$\sigma(x)$
VP5	1UAV	26	960	15	23	18,4615	2,1399
VP6	1UAV	22	395	13	24	17,9545	2,9677
VP7	1UAV	33	591	13	36	18,7879	5,0975
VP8	1UAV	36	636	14	31	17,66	3,7796
VP5	3UAVs	11	176	13	19	16,00	2,0494
VP6	3UAVs	16	294	15	30	17,4375	3,9152
VP7	3UAVs	24	409	13	23	17,0417	2,7104
VP8	3UAVs	23	383	14	23	16,65	2,4608

Tabelle 7.2: Variation in der Anzahl durchgeführter Aktionen in der Bearbeitung der Indikatoraufgabe

Hierbei zeigt sich im ungünstigsten Fall (VP7-1UAV) eine Spanne von 23 Aktionen in der Durchführung der Indikatoraufgabe von der kürzesten zur längsten Ausprägung. Abbildung 7.3 veranschaulicht graphisch die auftretenden Streuungen in der Durchführung der Indikatortaufgaben anhand der Standardabweichungen für die Führung von einem bzw. drei UAVs für die Versuchspersonen VP5 bis VP8.

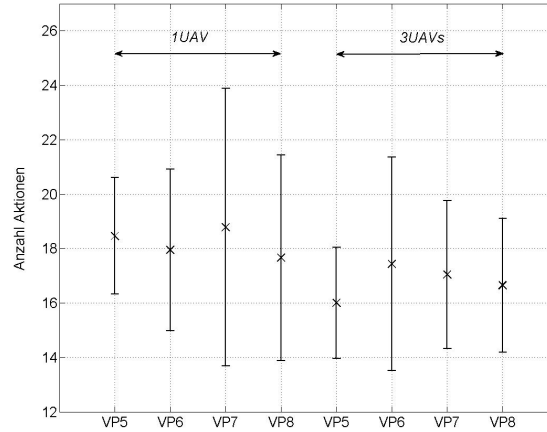


Abbildung 7.3: Standardabweichung in der Anzahl durchgeführter Aktionen in der Durchführung der Indikatortaufgabe betrachtet für die Versuchspersonen VP5-VP8 in der Führung von einem und drei UAVs

Die Variation in der Anzahl der Aktionen bedingt ferner eine Änderung in der Sequenz an durchgeführten Einzelaktionen. Dies zeigt sich am deutlichsten im Vergleich verschiedener Interaktionssequenzen in der Bearbeitung der Indikatortaufgabe, dargestellt im Folgenden für die Bearbeitung der Indikatortaufgabe für die Objekte 2 und 10 durch die Versuchsperson VP5 in der Führung von einem UAV (vgl. Abbildung 7.4).

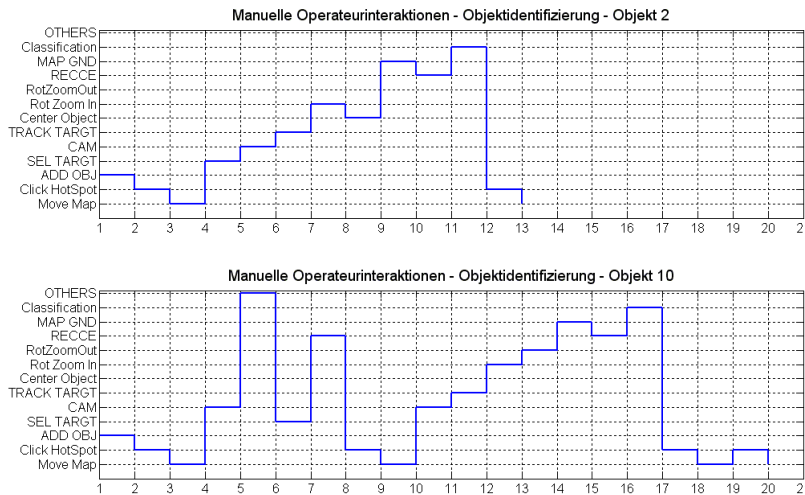


Abbildung 7.4: Variabilität in der Ausprägung und Länge von Operateurverhaltenssequenzen in der Bearbeitung der Indikaturaufgabe durch Versuchsperson VP5 für die Objekte 2 und 10

Wird neben dem manuellen auch das visuelle Operateurverhalten betrachtet, treten weitere Variation im Verhalten auf. Diese resultieren aus dem unterschiedlichen Informationsaufnahmeverhalten der Operateure (*bottom-up* und *top-down* gesteuert) und spiegeln sich in einer Variation der Aufmerksamkeitszuwendung zu Objekten, sowie in unterschiedlich langen Verweildauern auf Objekten wider. Weitere Variationen ergeben sich durch die Güte und Verfügbarkeit visueller Interaktionsdaten.

7.2 Hidden Markov Modelle als Modellierungsansatz

Wie Abschnitt 7.1 zeigt, ist das beobachtete Verhalten in ein und derselben Aufgabensituation, nämlich der Indikaturaufgabe, keineswegs immer identisch. Vielmehr treten von Fall zu Fall Modifikationen in der Reihenfolge, Dauer und Anzahl von Interaktionen auf.

Daher ist es eine wesentliche Forderung an die Modellierungsmethode, robust gegen diese Variabilität zu sein und dennoch die Regelmäßigkeiten des Verhaltens abzubilden.

Ferner soll die Modellierungsmethode die sequentielle Charakteristik von Verhalten aufgreifen und explizit verarbeiten können. Die darin enthaltene Abfolgeinformation stellt eine wesentliche Informationsquelle für abweichendes Verhalten dar (vgl. Kapitel 5.1.3.8). Sie ist im Rahmen der Modellierung entsprechend zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollen die resultierenden Modelle den mehrdeutigen Zusammenhang zwischen beobachtetem Verhalten und zugrunde liegender Aufgabensituation (*recognise & tag, classify, insert result*) abbilden können.

Eine Möglichkeit derartige Zusammenhänge unter den gegebenen Randbedingungen abzubilden bieten statistische Modellierungsansätze wie *Hidden Markov Modelle (HMM)*. Bekannt aus den Anwendungsdomänen der Spracherkennung (z.B. [Rabiner und Juang, 1994]), der Gesten- /Bildererkennung [Tanguay, 1993], Handschrifterkennung [Brakensieck, 2002] [Schenk und Rigoll, 2010], oder der Bioinformatik (z.B. Proteinstrukturanalyse) besitzen diese mathematischen Modelle die Fähigkeit mit Datensätzen unterschiedlicher Länge umzugehen, diese zu segmentieren und zu klassifizieren. Hierfür verwenden sie **sequentielle** Informationen und ermöglichen es auf Basis einer Beobachtungsfolge (z.B. *Aktionen*) probabilistisch auf die modellierten, verborgenen Zustände (z.B. *Teilaufgaben*) des Modells zu schließen. Durch einen im Vorfeld stattfindenden Trainingsprozess ist es möglich, die Dynamik der Observationen wie auch der Zustände des Modells entsprechend zu trainieren, wodurch es HMMs gelingt, sich an die zeitlichen Veränderlichkeiten des modellierten Prozesses anzupassen.

7.3 HMM - Formale Definition

Mathematisch betrachtet bezeichnet der Begriff *Hidden Markov Modelle* doppelt stochastische Prozesse². Der erste stochastische Prozess bezieht sich auf die Dynamik der nach außen hin verborgenen („*hidden*“) Zustände. Diese Zustände eines Modells werden mit $S = S_1, S_2, \dots, S_N$, der Zustand zur Zeit t mit q_t bezeichnet. Häufig unterliegt dieser Prozess der vereinfachenden Annahme, dass sein Verhalten im aktuellen Zustand ausschließlich von dem zuvor eingenommenen Zustand abhängig ist.

$$P(S_t|S_1, \dots, S_{t-1}) = P(S_t|S_{t-1}) \quad (7.1)$$

Diese Annahme wird mit Begriffen *Gedächtnislosigkeit*, *begrenztem Horizont*, sowie *Markov-Eigenschaft 1. Ordnung* bezeichnet.³ Modelle die sich dieser Limitierung unterwerfen, werden mit Hidden Markov Modell 1. Ordnung benannt. In vielen Anwendungsdomänen wie der Spracherkennung [Fink, 2003] [Rabiner, 1989] [Manning und Schütze, 1999], der Schrifterkennung [Brakensieck, 2002], aber auch in der Modellierung von Blickverhalten [Simola u. a., 2008]) ist diese Annahme tendenziell eher unzulässig. Sie wird jedoch verwendet, um die Rechenkomplexität dieser Modelle deutlich zu reduzieren. Trotz der Vernachlässigung zurückliegender Informationen weisen diese Modelle eine ausreichend hohe Erkennungsleistung auf, so dass diese Einschränkungen im Allgemeinen toleriert werden.

Der zweite stochastische Prozess erzeugt zu jedem Zeitpunkt t beobachtbare Ereignisse (sog. Emissionen) in Form von Ausgabesymbolen O_t . Diese können diskret, kontinuierlich, oder semikontinuierlich vorliegen. Sie sind als Einziges vom Verhalten des Modells beobachtbar. Die Wahrscheinlichkeit dieser Beobachtungen ist nur vom aktuell eingenommenen Zustand S_t abhängig, nicht von Zuständen oder Emissionen der Vergangenheit [Fink, 2003].

$$P(O_t|O_1, \dots, O_{t-1}, S_1, \dots, S_t) = P(O_t|S_t) \quad (7.2)$$

Ein Hidden Markov Modell 1. Ordnung lässt sich vollständig durch nachfolgende Parameter beschreiben:

- Einem endlichen Zustandsalphabet. Dieses bezeichnet die Anzahl der (verborgenen) Zustände $S = S_1, S_2, \dots, S_N$ eines Modells.
In praktischen Anwendungsbereichen wird diesen Zuständen bzw. Gruppen von Zuständen oftmals eine physikalische Bedeutung zugewiesen [Rabiner und Juang, 1994].
- Einem endlichen Ausgabealphabet (Emissionen), charakterisiert durch die Anzahl M an verschiedenen Observationssymbolen pro Zustand. Ein Observationssymbol steht für eine physikalische Ausgabe des modellierten Systems $V = v_1, v_2, \dots, v_M$ ⁴.
- Die *Anfangswahrscheinlichkeitsverteilung* $\Pi = [\pi_i]$. Sie charakterisiert die Wahrscheinlichkeit zu einem Zeitpunkt $t = 1$ im Zustand i zu beginnen:

$$\pi_i = P[q_1 = i], \quad \pi_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^N \pi_i = 1 \quad (7.5)$$

²Ein stochastischer Prozess (Zufallsprozess) beschreibt eine zeitliche Abfolge von beobachtbaren Ereignissen, die anhand diskreter oder kontinuierlicher Werte wahrgenommen werden können. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass die Messwerte in ihrer zeitlichen Abfolge voneinander abhängig sind, d.h. ein Ereignis zu einem Zeitpunkt beeinflusst stets ein Nachfolgendes.

³Prinzipiell sind auch Markoveigenschaften n -ter Ordnung möglich, mit der Konsequenz, dass hier die n letzten Zustände mit in Betracht zu ziehen sind [Rabiner und Juang, 1994] [Rabiner, 1989] [Fink, 2003].

⁴Definiert man Q als feste Zustandssequenz der Länge T und die korrespondierenden Observationen O , gilt nach [Fink, 2003]:

$$Q = q_1, q_2, \dots, q_T \quad (7.3)$$

$$O = o_1, o_2, \dots, o_T \quad (7.4)$$

- Die *Übergangsmatrix* $A = [a_{ij}]_{N \times N}$ mit den (Zustands-) Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$a_{ij} = P[q_{t+1} = j | q_t = i], \quad \alpha_{ij} \geq 0, \quad \sum_{j=1}^N a_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (7.6)$$

Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeiten für den Wechsel von einem Zustand i in einen Zustand j .

- Die Matrix der *Emissionswahrscheinlichkeiten* $B = [b_j(m)]_{N \times M}$. $b_{j,m}$, auch Emissions- bzw. Produktionswahrscheinlichkeit genannt, bezeichnet die Wahrscheinlichkeit mit der der aktuelle Zustand j das Zeichen m produziert [Wendemuth, 2004]. Für den in dieser Arbeit verwendeten diskreten Fall gilt für die Emissionswahrscheinlichkeit:

$$b_j(m) = P[O_t = v_m | q_t = j], \quad b_j(O_m) \geq 0, \quad \sum_{m=1}^M b_{jm} = 1 \quad \forall j \quad (7.7)$$

Die Wahl der Emissionsmodellierung bestimmt die Art des HMM. So spricht man im Falle von diskreten Emissionen von *diskreten* HMMs.

Die Modellstruktur eines HMM λ (1.Ordnung) lässt sich unter Verwendung der Parametermatrizen wie folgt kompakt darstellen.

$$\lambda = (\pi, A, B) \quad (7.8)$$

In dem hier vorgesehenen Anwendungskontext soll unter Verwendung von HMMs das charakteristische Aufgabenverhalten in der Durchführung der Indikатораufgabe modelliert werden. Dabei werden die in der Indikатораufgabe auftretenden Teilaufgaben als verborgene Zustände und die vom Operateur geäußerten manuellen Aktionen im Umgang mit dem System als diskrete Observationen bzw. Emissionen betrachtet.

Da die hier betrachtete Indikатораufgabe durch kurze Observationssequenzen charakterisiert ist, die jedoch infolge der wiederholten Durchführung dieser Aufgabe im Rahmen der Missionserfüllung mehrfach vorliegen, wird im Folgenden der Ansatz verfolgt, die Parameterermittlung des zugehörigen HMMs unter Verwendung mehrerer Beobachtungssequenzen $O^{(k)} = O_1^{(k)}, O_2^{(k)}, \dots, O_{T^k}^{(k)}$ zu ermitteln. Die einzelnen Beobachtungssequenzen können dabei unterschiedliche Längen (T^k) besitzen.

7.4 Grundlegende Aufgaben bei HMMs

Die grundlegenden Aufgaben bei der Nutzung von HMMs widmen sich der Beantwortung der drei Problemstellungen *Training*, *Evaluation* und *Dekodierung*.

- Das *Training* steht für die Anpassung eines initial definierten Modells λ an eine gegebene Beobachtungsfolge $O^{(k)} = O_1^{(k)} + O_2^{(k)} + \dots + O_{T^k}^{(k)}$ mit dem Ziel die stochastischen Eigenschaften der Beobachtungsfolge möglichst gut abzubilden.
- Die *Evaluation* dient der Bestimmung der (Produktions-)Wahrscheinlichkeit $P(O|\lambda)$. Sie steht für die Wahrscheinlichkeit mit der ein gegebenes Modell λ eine gegebene Observationsfolge $O = O_1 + O_2 + \dots + O_T$ erzeugt.
- Der Begriff der *Dekodierung* hingegen bezeichnet die Ermittlung der wahrscheinlichsten Zustandssequenz q^* mit der ein gegebenes Modell λ eine ebenfalls gegebene Observationsfolge $O = O_1 + O_2 + \dots + O_T$ generiert.

In der Praxis werden diese verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von HMMs oftmals in Kombination angewendet. Dieses Vorgehen soll in Abbildung 7.5 veranschaulicht werden.

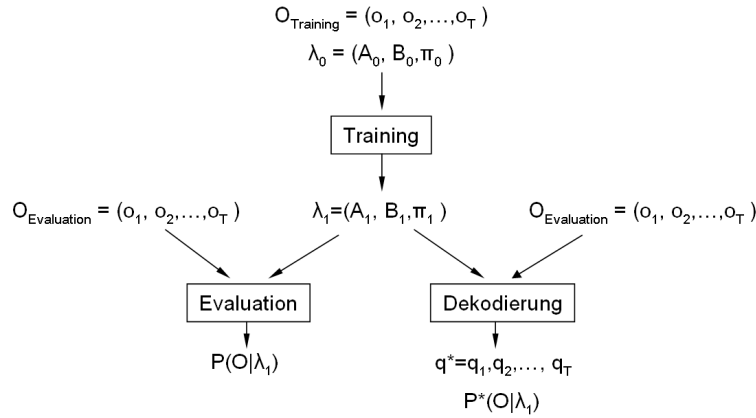


Abbildung 7.5: Klassischer Einsatz von HMMs

Den Ausgangspunkt stellt dabei für gewöhnlich zunächst das Training eines HMMs dar. Hierbei wird ein initial vorgegebenes Modell λ_0 an die Beobachtungsdaten der realen Welt, in diesem Fall an die vom Operateur in der Bearbeitung der Indikatortaufgabe geäußerten manuellen Aktionen, angepasst. Die weitere Verwendung dieses trainierten Modells λ_1 kann dann auf unterschiedliche Weise erfolgen.

So besteht die Möglichkeit durch Berechnung der Produktionswahrscheinlichkeit $P(O|\lambda)$ zu ermitteln, wie gut das Modell λ_1 eine Evaluierungsdatenfolge $O_{Evaluation} = O_1 + O_2 + \dots + O_T$ erzeugt (*Evaluation*). Damit stellt es in dieser Form zunächst einmal ein Gütemaß für das Modell dar.

Tendenziell wird die Produktionswahrscheinlichkeit jedoch eher als Klassifikationskriterium eingesetzt. Dies ist insbesondere der Fall, wenn mehrere verschiedene HMMs λ_i existieren und identifiziert werden soll, welches dieser Modelle die Beobachtungsfolge am wahrscheinlichsten erzeugt hat (vgl. Abbildung 7.6):

$$\lambda_i = \underset{i}{\operatorname{argmax}} P(O|\lambda_i) \quad (7.9)$$

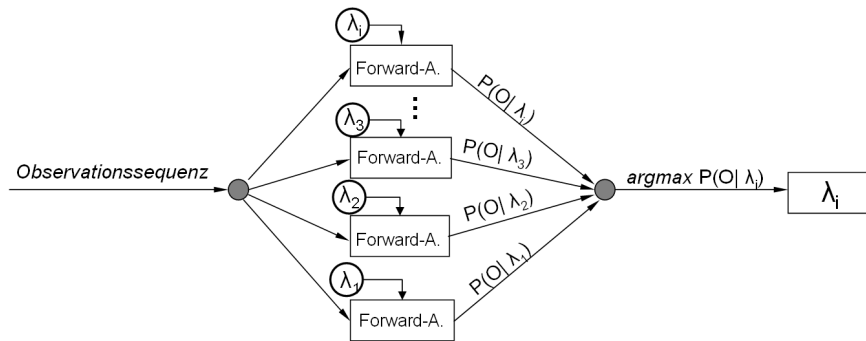


Abbildung 7.6: Verwendung von Produktionswahrscheinlichkeiten zur Klassifikation von HMMs

Sind die Zustände eines HMM mit einer physikalisch relevanten Bedeutung versehen, so ist es in diesen Fällen oftmals bedeutsamer, die internen Abläufe des Modells verfolgen zu können, statt das globale Gütemaß $P(O|\lambda_1)$ zu betrachten. Im Rahmen der *Dekodierung* wird daher

die wahrscheinlichste Zustandssequenz eines Modells λ_i ermittelt, mit der eine Observationsfolge $O_{\text{Evaluation}} = O_1 + O_2 + \dots + O_T$ erzeugt wurde.

Diese Vorgehensweise ist auch im Rahmen dieser Arbeit vordergründig zu betrachten. So ist es das Ziel anhand beobachtbarer Aktionssequenzen des Operators auf die von ihm bearbeitete (Teil-) Aufgabe, modelliert als verborgene Zustände des Aufgabenmodells, zu schließen.

Die im Rahmen der Dekodierung ermittelte Zustandsfolge wird als optimale Zustandssequenz q^* bezeichnet. Sie kann wiederum verwendet werden, um die optimale Produktionswahrscheinlichkeit $P^*(O|\lambda_1)$ zu ermitteln, mit der die Observationsfolge entlang der optimalen Zustandssequenz erzeugt wurde. Hierbei handelt es sich um ein Gütemaß, das überwiegend in der Spracherkennung favorisiert wird [Fink, 2003].

Für die Modellierung von Operateurverhalten sowie den Rückschluss auf die vom Operateur bearbeitete Aufgabensituation werden in erster Linie das *Training* und die *Dekodierung* der hier vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten von HMMs adressiert. Da das Training auf die Produktionswahrscheinlichkeit (*Evaluation*) zurückgreift, werden im Folgenden die Algorithmen für die Realisierung dieser Verwendungsmöglichkeiten in der Reihenfolge *Evaluation*, *Training* und *Dekodierung* vorgestellt.

7.4.1 Evaluation

Ziel der Evaluation ist es die Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, mit der eine Observationsfolge $O^{(k)} = O_1^{(k)} + O_2^{(k)} + \dots + O_T^{(k)}$ von einem HMM λ erzeugt wurde. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Observationsfolge infolge des probabilistischen Zusammenhangs zwischen Observationen und Zuständen durch eine beliebige Zustandsfolge gleicher Länge erzeugt werden kann. Dies hat zur Folge, dass bei N Zuständen und einer Observationslänge T N^T mögliche Zustandssequenzen betrachtet und ihre Einzelwahrscheinlichkeiten zur Generierung dieser Observationssequenz aufsummiert werden müssen.

Um den exponentiell von der Observationslänge abhängigen Rechenaufwand zu reduzieren, wird für die Berechnung der Produktionswahrscheinlichkeit auf den deutlich effizienteren *Vorwärtsalgorithmus* zurückgegriffen. Dieser nutzt neben der *Markov-Eigenschaft* auch das Prinzip der *dynamischen Programmierung*, die eine Wiederverwendung bereits ermittelter Teilsequenzen vorsieht. Dieses Vorgehen reduziert den ursprünglich exponentiell mit der Sequenzlänge einhergehenden Rechenaufwand zu einem nur mehr linearen Zusammenhang [Pfister und Kaufmann, 2008].

Der Vorwärtsalgorithmus sieht hierfür zunächst die Definition einer Vorwärtsvariable $\alpha_t(i)$ vor. Sie stellt die Wahrscheinlichkeit dar, bei gegebenem Modell λ den Anfang der betrachteten Observationsfolge bis $O_t^{(k)}$ zu erzeugen und zum Zeitpunkt t den Zustand i zu erreichen [Rabiner, 1989]:

$$\alpha_t^k(i) = P(O_1^{(k)}, O_2^{(k)}, \dots, O_t^{(k)}, s_t = i | \lambda) \quad (7.10)$$

Initialisierung:

Für den Zeitpunkt $t = 1$ ermittelt sich die Vorwärtsvariable aus dem Produkt der Startwahrscheinlichkeit π_i und der Emissionswahrscheinlichkeit im Zustand i die Observation $O_1^{(k)}$ zu generieren:

$$\alpha_1^k(i) = \pi_i b_i(O_1^{(k)}), \quad 1 \leq i \leq N \quad (7.11)$$

Induktion:

Unter Berücksichtigung der *Markov-Eigenschaft* und der dynamischen Programmierung errechnet sich die Vorwärtsvariable für die nachfolgenden Zeitpunkte $t + 1$ aus der Summe über alle Vorgängervariablen $\alpha_t^k(i)$ multipliziert mit der Übergangswahrscheinlichkeit vom Zustand i zum aktuellen Zustand j . Ferner wird im Zustand j zum Zeitpunkt $t + 1$ die Observation $O_{t+1}^{(k)}$ mit der entsprechenden Emissionswahrscheinlichkeit $b_j(O_{t+1}^{(k)})$ erzeugt. Damit ergibt sich für die Vorwärtsvariable:

$$\alpha_{t+1}^k(j) = \left[\sum_{i=1}^N \alpha_t^k(i) \cdot a_{ij} \right] b_j(O_{t+1}^{(k)}), \quad \begin{matrix} 1 \leq t \leq T-1 \\ 1 \leq j \leq N \end{matrix} \quad (7.12)$$

Terminierung:

Die Gesamtproduktionswahrscheinlichkeit $P(O^{(k)}|\lambda)$ zum Zeitpunkt T erhält man durch Summation über die N ermittelten Vorwärtswahrscheinlichkeitsanteile⁵:

$$P(O^{(k)}|\lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_T^k(i) \quad (7.13)$$

Die Berechnung der Vorwärtswahrscheinlichkeit erfordert die wiederholte Multiplikation von Übergangs- und Emissionswahrscheinlichkeiten, die jeweils Werte kleiner Eins aufweisen. Mit zunehmender Observationslänge $t \rightarrow \infty$ streben die Werte von $\alpha_t^k(i)$ exponentiell gegen Null und verlassen dabei den darstellbaren Bereich der Fließkommazahlen des Rechners (*Underflow-Problem*) [Knab, 2000]. Um diesen Problem entgegen zu wirken, wird für die Berechnung der Vorwärtswahrscheinlichkeiten ein Skalierungsverfahren verwendet, indem die Vorwärtswahrscheinlichkeiten in jedem Zeitschritt mit einem zeitabhängigen Faktor multipliziert werden⁶. Dies ermöglicht es, trotz großer Observationslängen t berechenbar zu bleiben [Rabiner, 1989]. Die hierfür notwendigen Schritte sind in Anhang B aufgeführt.

7.4.2 Training

Mit dem Training werden die Parameter eines initial vorgegebenen HMM $\lambda = (\pi, A, B)$ so modifiziert, dass das resultierende Modell die statistischen Eigenschaften der trainierten Beobachtungsfolge möglichst gut abbildet. Für dieses Vorgehen existiert bis dato keine analytische Methode, so dass hierfür auf ein iteratives Verfahren zurückgegriffen werden muss. Für gewöhnlich wird hierfür der *Baum-Welch-Algorithmus* verwendet [Fink, 2003]. Er stellt eine Variante des *Expectation-Maximization (EM)* Algorithmus dar, der eine Maximierung der Produktionswahrscheinlichkeit $P(O|\lambda)$ durch entsprechende Schätzung der Modellparameter vorsieht.

Der zugrunde liegende Algorithmus lässt sich dabei in nachfolgende Berechnungsschritte unterteilen [Wunsch, 2001]. Diese werden in jedem Iterationsschritt durchgeführt.

- Berechnung der Wahrscheinlichkeit mit der das aktuelle Modell die gegebene Observationsfolge erzeugt.
- Berechnung der Anzahl der Übergänge zwischen den Zuständen, als auch der Häufigkeit mit der Ausgabesymbole in diesen Zuständen emittiert werden.
- Ermittlung der erwarteten Anzahl an Zustandsübergängen und Emissionen des Modells.
- Aktualisierung der Zustands- und Emissionswahrscheinlichkeiten auf Basis der relativen Häufigkeiten.
- Erneute Berechnung der Produktionswahrscheinlichkeit unter Verwendung aktualisierter Parameterwerte.

⁵ Die Produktionswahrscheinlichkeit lässt sich auch durch die Verwendung von Vorwärts- und Rückwärtswahrscheinlichkeiten errechnen. In diesem Fall gilt: $P(O|\lambda) = \sum_i \alpha_t(i) \beta_t(i)$

⁶ Gleiches gilt für die Rückwärtswahrscheinlichkeiten (vgl. Abschnitt 7.4.2), die analog zu Vorwärtswahrscheinlichkeiten berechnet werden.

Dabei garantiert der verwendete EM-Algorithmus, dass die Wahrscheinlichkeit des aktualisierten Modells $\hat{\lambda}$ im Gegensatz zum Ausgangsmodell λ verbessert wird, oder zumindestens gleich bleibt [Fink, 2003]. Letzteres ist der Fall, wenn im Rahmen des Trainings ein lokales Maximum erreicht wurde.

$$P(O|\hat{\lambda}) \geq P(O|\lambda) \quad (7.14)$$

Die Verbesserung der Modellparameter im Rahmen des Trainings erfolgt unter Verwendung der Vorwärts- und Rückwärtswahrscheinlichkeiten $\alpha_t(i)$ und $\beta_t(j)$.

Analog zum Vorwärtsalgorithmus (vgl. Abschnitt 7.4.1) wird im Rückwärtsalgorithmus zunächst eine Rückwärtsvariable $\beta_t^k(i)$ definiert [Rabiner, 1989]:

$$\beta_t^k(i) = P(O_{t+1}^{(k)}, O_{t+2}^{(k)}, \dots, O_T^{(k)} | q_t = S_i, \lambda) \quad (7.15)$$

Sie definiert die Wahrscheinlichkeit bei einem gegebenen Modell λ die partielle Observationsfolge von $t+1$ bis zum Ende zu erzeugen und zum Zeitpunkt T den Zustand i zu erreichen. Strukturell analog zum Vorwärtsalgorithmus ermitteln sich die Rückwärtswahrscheinlichkeiten wie folgt induktiv.

Initialisierung:

$$\beta_T^k(i) = 1, \quad 1 \leq i \leq N \quad (7.16)$$

Induktion:

$$\beta_t^k(i) = \sum_{j=1}^N a_{ij} b_j(O_{t+1}^{(k)}) \beta_{t+1}^k(j), \quad t = T-1, T-2, \dots, 1 \quad (7.17)$$

$$1 \leq i \leq N$$

Der eigentliche Trainingsalgorithmus gliedert sich im Wesentlichen in zwei Schritte, die als *Estimation-Step* und *Maximation-Step* bezeichnet werden.

Im *Estimation-Step* werden unter Verwendung der Hilfsvariablen $\gamma_t^k(i)$ und $\xi_t^k(i, j)$ die erwartete Anzahl an Zustandsübergängen und Emission berechnet.

$\gamma_t^k(i)$ bezeichnet dabei die Wahrscheinlichkeit, für das Auftreten des Zustandes i zum Zeitpunkt t bei gegebener Observationssequenz:

$$\gamma_t^k(i) = P(q_t = S_i | O^{(k)}, \lambda) \quad (7.18)$$

Mit Hilfe des *Satzes von Bayes* lässt sich diese Wahrscheinlichkeit unter Verwendung der Vorwärts- und Rückwärtswahrscheinlichkeiten wie folgt darstellen ([Rabiner und Juang, 1994]):

$$\gamma_t^k(i) = \frac{\alpha_t^k(i) \beta_t^k(i)}{P(O^{(k)} | \lambda)} = \frac{\alpha_t^k(i) \beta_t^k(i)}{\sum_{i=1}^N \alpha_t^k(i) \beta_t^k(i)} \quad (7.19)$$

$\xi_t^k(i, j)$ bezeichnet die Wahrscheinlichkeit für den Zustandsübergang aus dem Zustand S_i zum Zeitpunkt t in den Zustand S_j zum Zeitpunkt $t+1$, bei gegebener Observationssequenz:

$$\xi_t^k(i, j) = P(q_t = S_i, q_{t+1} = S_j | O^{(k)}, \lambda) \quad (7.20)$$

Wie bereits $\gamma_t^k(i)$, so lässt sich auch $\xi_t^k(i, j)$ unter Verwendung der Vorwärts- und Rückwärtswahrscheinlichkeiten errechnen, erweitert um den Zustandsübergang von i nach j durch $a_{ij} b_j(O_{t+1}^{(k)})$:

$$\xi_t^k(i, j) = \frac{\alpha_t^k(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}^{(k)}) \beta_{t+1}^k(j)}{P(O^{(k)} | \lambda)} = \frac{\alpha_t^k(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}^{(k)}) \beta_{t+1}^k(j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_t^k(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}^{(k)}) \beta_{t+1}^k(j)} \quad (7.21)$$

Durch Summation über j lässt sich $\gamma_t^k(i)$ durch $\xi_t^k(i, j)$ ausdrücken:

$$\gamma_t^k(i) = \sum_{j=1}^N \xi_t^k(i, j) \quad (7.22)$$

Die Berechnung der Übergänge zwischen den Zuständen S_i und S_j , sowie die Anzahl der Aufenthalte im Zustand S_i ergibt sich durch Summation über die Observationslänge und Observationssequenzen.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \gamma_t^k(i) \equiv \text{erwartete Anzahl der Aufenthalte im Zustand } S_i \quad (7.23)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \xi_t^k(i, j) \equiv \text{erwartete Anzahl der Übergänge von Zustand } S_i \text{ in } S_j \quad (7.24)$$

Im *Maximation-Step* werden die aktuell aufgestellten Erwartungswerte herangezogen, um die Parameter eines HMM neu zu ermitteln. Hierbei wird auf die skalierten Werte von $\hat{\alpha}$ und $\hat{\beta}$ (vgl. Anhang B) zurückgegriffen. Nach [Knab, 2000] lassen sich die neuen Parameter des HMM wie folgt ermitteln.

$$\hat{\pi} = \text{Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt } t = 1 \text{ im Zustand } S_i \text{ zu sein} \quad (7.25)$$

$$\pi_1^k(i) = \frac{\sum_{k=1}^K \hat{\alpha}_1^k(i) \hat{\beta}_1^k(i)}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \hat{\alpha}_t^k(i) \hat{\beta}_t^k(i)} \quad (7.26)$$

$$\hat{a}_{ij} = \frac{\text{erwartete Anzahl der Übergänge von Zustand } i \text{ nach } j}{\text{erwartete Anzahl der Übergänge von Zustand } i \text{ aus}} \quad (7.27)$$

$$\hat{\alpha}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \xi_t^k(i, j)}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \gamma_t^k(i)} \quad (7.28)$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \hat{\alpha}_t^k(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}^k) \hat{\beta}_{t+1}^k(j) c_{t+1}^k}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \hat{\alpha}_t^k(i) \hat{\beta}_t^k(i)} \quad (7.29)$$

$$\hat{b}_i(o_m) = \frac{\text{erwartete Anzahl der Emissionen von } o_m \text{ im Zustand } i}{\text{erwartete Gesamtanzahl der Emissionen im Zustand } i} \quad (7.30)$$

$$\hat{b}_i(o_m) = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t^k(i) \cdot \delta_{o_t, v_m}}{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t^k(i)}, \text{ mit Kronecker-Delta } \delta_{o_t, v_m} = \begin{cases} 1 & , \text{ wenn } o_t = v_m \\ 0 & , \text{ wenn } o_t \neq v_m \end{cases} \quad (7.31)$$

$$\hat{b}_i(o_m) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \hat{\alpha}_t^k(i) \hat{\beta}_t^k(i) \cdot \delta_{o_t, v_m}}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T^k-1} \hat{\alpha}_t^k(i) \hat{\beta}_t^k(i)} \quad (7.32)$$

Der Trainingsvorgang wird so lange aufrecht erhalten, bis ein definiertes Konvergenzkriterium ϵ erreicht, oder eine a-priori definierte Anzahl an Iterationen durchgeführt wurde. Die Konvergenz kann dabei beispielsweise auf die logarithmische *Produktionswahrscheinlichkeit* (vgl. [Hayashi, 2004]), oder auf die *Kullback-Leibler-Distanz* (vgl. [Boussemart, 2011]) bezogen werden.

Bei der Verwendung des *Baum-Welch-Algorithmus* ist zu berücksichtigen, dass dieser lediglich ein *lokales Optimum* erreichen kann. Um ein Maximum nahe eines globalen Maximums zu erreichen, ist die initiale Wahl der Parameter A_0, B_0, π_0 des Modells entscheidend. Bedeutend ist dabei die Wahl der Parameter der Emissionswahrscheinlichkeitsmatrix. [Rabiner, 1989] empfiehlt diese Parameter möglichst unter Einbeziehung von Expertenwissen zu wählen. [Rabiner und Juang, 1994] zeigen diesbezüglich verschiedene Ansätze auf, um Parameter der Emissionswahrscheinlichkeitsmatrix initial zu schätzen.

7.4.3 Dekodierung

In dem als *Dekodierung* bezeichneten Vorgang wird aus der Vielzahl an möglichen Zustandssequenzen für die Generierung einer bestimmten Beobachtungssequenz $O = O_1 + O_2 + \dots + O_T$ diejenige ermittelt, die die Beobachtungssequenz mit größter Wahrscheinlichkeit erzeugt. Als Algorithmus wird hierfür der *Viterbi-Algorithmus* [Forney, 1973] verwendet. Im Unterschied zum Vorwärtsalgorithmus sieht der Viterbi-Algorithmus nicht mehr die Summation über die einzelnen Wahrscheinlichkeitsanteile, sondern eine Maximierung über diese vor.

Ausgangsbasis hierfür ist zunächst die Definition *partiell optimaler Pfadwahrscheinlichkeiten* $\delta_t(i)$, die die Observationsfolge bis O_t mit maximaler Wahrscheinlichkeit erzeugen und im Zustand i enden:

$$\delta_t(i) = \max_{s_1, s_2, \dots, s_{t-1}} P(O_1, O_2, \dots, O_t, s_1, s_2, \dots, s_{t-1}, s_t = i | \lambda) \quad (7.33)$$

Zudem wird eine weitere Hilfsvariable, der so genannte „*Rückwärtszeiger*“ $\psi_t(j)$ eingeführt. Dieser speichert für jedes $\delta_t(j)$ den jeweils optimalen Vorgängerzustand.

Zum Zeitpunkt $t = 1$ ermittelt sich die partiell optimale Pfadwahrscheinlichkeit identisch zum Vorwärtsalgorithmus. Da zu diesem Zeitpunkt noch kein Vorgängerzustand existiert, wird der Rückwärtszeiger entsprechend mit Null initialisiert.

Initialisierung:

$$\delta_1(i) = \pi_i b_i(O_1), \quad 1 \leq i \leq N \quad (7.34)$$

$$\psi_1(i) = 0, \quad 1 \leq i \leq N \quad (7.35)$$

Mit dem Unterschied der *lokalen* Maximierung ermitteln sich die partiell optimalen Pfadwahrscheinlichkeiten identisch zum Vorwärtsalgorithmus. Parallel dazu speichert der „*Rückwärtszeiger*“ für jedes $\delta_{t+1}(j)$ den optimalen Vorgängerzustand:

Rekursion:

$t = 1, \dots, T - 1$

$$\delta_{t+1}(j) = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_t(i) a_{ij}] b_j(O_{t+1}), \quad 1 \leq j \leq N \quad (7.36)$$

$$\psi_{t+1}(j) = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} [\delta_t(i) a_{ij}], \quad 1 \leq j \leq N \quad (7.37)$$

Rekursionsabschluss:

Zum Zeitpunkt T ergibt sich die optimale Produktionswahrscheinlichkeit zu:

$$P^*(O | \lambda) = P(O, s^* | \lambda) = \max_{1 \leq i \leq N} \delta_T(i) \quad (7.38)$$

Ausgangspunkt für den optimalen Pfad bildet der Zustand j , der die Pfadwahrscheinlichkeit $\delta_T(i)$ maximiert.

$$s_T^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} \delta_T(i) \quad (7.39)$$

Ausgehend vom Ende der Zustandsfolge wird der Verlauf des optimalen Pfades mit Hilfe des Rückwärtszeigers $\psi_t(j)$ rekursiv in zeitlich umgekehrter Reihenfolge aufgebaut.

Rückverfolgung des optimalen Pfades:

für alle Zeitpunkte $t = T - 1, \dots, 1$:

$$s_t^* = \psi_{t+1}(s_{t+1}^*) \quad (7.40)$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich sowohl die optimale Wahrscheinlichkeit $P^*(O|\lambda)$, als auch die optimale Zustandsfolge s^* erst nach Betrachtung der gesamten Observationslänge ermitteln lassen.

Ähnlich wie bereits beim Vorwärts- und Rückwärtsalgorithmus können auch beim Viterbi-Algorithmus die Pfadwahrscheinlichkeiten als Folge wiederholter Multiplikationen von Wahrscheinlichkeiten rasch sehr klein werden, so dass auch hier die Gefahr des *Underflows* besteht. Um diesen zu entgegnen wird der Viterbi-Algorithmus im Allgemeinen logarithmisch berechnet (vgl. Anhang C).

7.5 Anwendungen von Hidden Markov Modellen in der Verhaltensmodellierung

In den letzten Jahren werden Hidden Markov Modelle nicht mehr nur in den eingangs erwähnten klassischen Anwendungsbereichen der Sprach- und Schrifterkennung, sondern zunehmend auch domänenübergreifend in Bereichen des Finanzwesens [Wichern, 2001] [Knab, 2000], der Physik [Weitzenberg u. a., 2000], aber auch in der Modellierung von Operateurverhalten verwendet. Hier sind insbesondere die Arbeiten von *Miwa Hayashi* und *Yves Boussemart* am MIT zu nennen. Sie verwenden Hidden Markov Modelle erstmals in einem luftfahrttechnischen Anwendungskontext für die Modellierung von Operateurverhalten. Ihre Arbeiten werden im Folgenden kurz dargestellt.

So verwendete [Hayashi, 2003] [Hayashi u. a., 2003] Hidden Markov Modelle für die Modellierung der Aufmerksamkeitsverteilung von Piloten in der Durchführung von Instrumentenlandeanflügen. Die übergeordnete Aufgabe der Piloten bestand darin, einem Flugpfad bestehend aus den Segmenten *straight & level*, *intercept*, *descent* unter Einhaltung verschiedener, segmentspezifischer Randbedingungen möglichst optimal zu folgen. Diese *manual-control* Aufgabe wurde unter Vernachlässigung möglicher Kopplungseffekte in die Teilaufgaben „*vertikale Flugführung*“, „*horizontale Flugführung*“ sowie „*Überwachung der Geschwindigkeit*“ unterteilt. Für die Durchführung dieser Aufgabe verfügten die Piloten über insgesamt sechs Instrumente (Attitude Indicator, Vertical Speed Indicator, Course Deviation Indicator, Turn & Slip Indicator, Heading Indicator, Airspeed Indicator), denen sie im Rahmen ihrer Aufgabenerfüllung abwechselnd Aufmerksamkeit zuwenden mussten. Dabei stellten einige der Instrumente gleichzeitig Information für die Bearbeitung mehrerer Aufgaben zur Verfügung. Mit Hilfe von Hidden Markov Modellen gelang es [Hayashi, 2004] die Teilaufgaben der Flugführung, modelliert als verborgene Zustände des Modells, auf Basis von Beobachtungssequenzen (Instrumentenfixationen) zu identifizieren. Eine deutliche Steigerung in der Erkennungsleistung der Modelle konnte dabei durch Berücksichtigung der individuellen Erfahrungsgrade erreicht werden. Diese besitzen einen wesentlichen Einfluss auf das Instrumentenscanverhalten und führen dazu, dass mit steigendem Erfahrungsgrad eine feinere Granulierung der Flugführungsaufgabe und damit eine höhere Anzahl an verborgenen Zuständen des Modells erforderlich sind.

Eine spätere Arbeit von [Hayashi u. a., 2005] bezog sich auf die Erkennung von Abweichungen im Scanverhalten bei Space-Shuttle Crew Mitgliedern, untersucht für das Missionsegment des Aufstiegs. Ziel dieser Arbeit war es, die Vernachlässigung der Betrachtung situationsrelevanter und damit kritischer Instrumente durch Operateure zu erkennen. Bei der hierbei betrachteten Aufgabe handelte es sich erstmals um eine (klassische) *supervisory-control* Aufgabe. Sie erforderte von Crewmitgliedern zur Aufrechterhaltung ihres Situationsbewußtseins bestimmte Instrumente bzw. Displays regelmäßig („*regular scanning*“), andere Instrumente hingegen nur zu definierten Zeitpunkten („*critical event scanning*“) zu überprüfen. In der Modellierung wurden daher reguläre und

kritische Überwachungsaufgaben als verborgene Zustände, die aufgabenspezifischen Instrumentenbeobachtungen (Fixationen) als Beobachtungsprozess gewählt. Die Abweichungen im regulären Scanverhalten wurden unter Verwendung der optimalen Produktionswahrscheinlichkeit P^* ermittelt. So spiegeln sich diese Abweichungen in geringeren Wahrscheinlichkeitswerten von P^* wieder und verdeutlichen damit, dass die Fixationsdaten nicht mehr optimal von den Modellparametern des HMM beschrieben werden können. Da sich P^* erst rekursiv auf Basis der optimalen Zustandssequenz ermitteln lässt (vgl. Kapitel 7.4.3), wurde von [Hayashi u. a., 2005] eine Segmentierung der Beobachtungsdaten auf 30 Fixationen vorgenommen. Dies entspricht einer Zeitdauer von etwa 15 Sekunden und ermöglicht es dadurch Abweichungen im Scanverhalten mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 15 Sekunden ermitteln zu können.

Eine erstmalige Modellierung von Operateurverhalten unter Verwendung von HMMs im Bereich der Führung unbemannter Vehikel (UV) findet sich bei [Boussemart und Cummings, 2008] [Boussemart, 2011] [Boussemart und Cummings, 2011]. Boussemart verwendet HMMs, um das Verhalten eines Operators in der Überwachung und Koordinierung verschiedener UVs (HALE-High Altitude Long Endurance, MALE-Medium Altitude Long Endurance, UUV-Unmanned Underwater Vehicle) im Rahmen einer Überwachungs- und Lokalisierungsaufgabe zu modellieren. Diese Aufgabe ist überwiegend durch die Systemüberwachung, aber auch durch diskrete Interaktionen mit dem System im Falle von UV-Umplanungsaufgaben und Lokalisierungen charakterisiert. Als Beobachtungsdaten wurden die manuellen Interaktionen mit dem System (z.B. Überwachung, Führung, Zielzuweisung zu den UVs) verwendet. Im Gegensatz zu den Arbeiten von [Hayashi, 2003] und [Hayashi u. a., 2005] die a-priori, die Zustände und ihre Bedeutung der Modelle festgelegt hat, wählte [Boussemart und Cummings, 2008] den Ansatz zunächst auf Grundlage der Beobachtungsdaten optimierte Modelle zu trainieren und erst a-posteriori die Bedeutung der resultierenden Zustände abzuleiten. [Boussemart, 2011] gelang es damit, das aktuelle Operateurverhalten auf Basis der modellierten Zustände zu erkennen, sowie zukünftige Aktionen unter Verwendung wahrscheinlichster Zustandsübergänge zu prognostizieren.

7.6 Modellerstellung

Aufbauend auf den bisher zunächst eher formalen Betrachtungen von Hidden Markov Modellen und der Vorstellung erster Arbeiten im Bereich der Operateurverhaltensmodellierung mit HMMs soll nun die Konkretisierung eines Modells vorgenommen werden. Die Modellierung soll exemplarisch für das individuelle Operateurverhalten der normativen Indikatoraufgabe durchgeführt werden. Ziel ist es unter Verwendung des erstellten Modells und der im Experiment beobachteten manuellen Aktionen des Operators einen Rückschluss auf die von ihm bearbeitete Aufgabe zu erlangen. Das hierfür notwendige Vorgehen umfasst zunächst eine Vorverarbeitung der im Vorfeld experimentell erfassten und bereits semantisch attribuierten Operateurverhaltensdaten, die Erstellung eines möglichst geeigneten Initialmodells unter Verwendung vorhandenen Expertenwissens und schließlich die Anwendung des Verfahrens und der unter Abschnitt 7.4 vorgestellten Algorithmen auf das Initialmodell und die Daten.

7.6.1 Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Modellentwicklung

Die Aufgabe besteht darin, die im Experiment gewonnenen Beobachtungssequenzen manuellen Verhaltens bei der Durchführung der Indikatoraufgabe unter normalen Beanspruchungsbedingungen in ein geschlossenes Modell zu überführen. Dieses Modell soll anschließend dazu verwendet werden, zu erkennen, an welcher Teilaufgabe der Operateur in der jeweiligen Situation arbeitet.

Dabei sollen die Teilaufgaben die verborgenen Zustände des Hidden Markov Modells darstellen. Damit besteht das Zustandsalphabet aus den Zuständen *recognize & tag*, *classify* und *insert result*. Die gemessenen manuellen Interaktionssequenzen repräsentieren hingegen die Beobachtungsfolge.

Die darin vorkommenden Observationssymbole finden sich in Tabelle 7.3 zusammengefasst. Im vorliegenden Fall besteht damit das Ausgabealphabet aus 13 abgrenzbaren manuellen Interaktionen. Weitere Einzelheiten zum Initialmodell finden sich im folgenden Abschnitt 7.6.2.

Für das eigentliche Training des Modells soll lediglich ein Teil der experimentell gemessenen Interaktionssequenzen herangezogen werden. Die verbleibenden Datensätze werden dann in einem letzten Schritt zur Validierung des Modells herangezogen. Dieser letzte Schritt ist gleichbedeutend mit der Anwendung eines geeignet trainierten Modells zur Aufgabenerkennung. Diese generelle Vorgehensweise ist in Abbildung 7.7 zusammenfassend dargestellt.

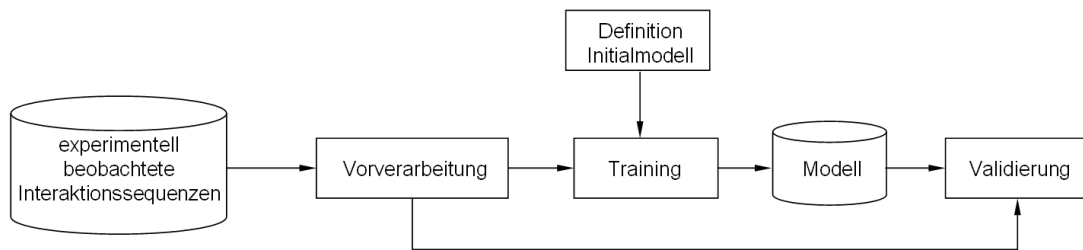


Abbildung 7.7: Vorgehensweise bei der Modellerstellung

7.6.2 Definition Initialmodell

Der im Training verwendete Baum-Welch(EM)-Algorithmus erreicht iterativ lediglich ein lokales Maximum. Um ein Maximum nahe des globalen Maximums und damit bestmögliche Erkennungsleistung des Modells zu erreichen ist folglich die Wahl des Initialmodells entscheidend [Rabiner und Juang, 1994] [Liu u. a., 2004] [Wichern, 2001] [Fink, 2003]. Bei der Wahl des Initialmodells sind folgende Parameter festzulegen:

- die Anzahl der Zustände,
- die Ordnung des Modells (m-ter Ordnung),
- die gewählte Topologie (z.B. ergodisch, linear, links-rechts),
- die Art (diskret, kontinuierlich, semi-kontinuierlich) und Anzahl der Observationssymbole, sowie
- die Parametermatrizen wie Startvektor, Zustandsübergangsmatrix und Emissionsmatrix.

Für die Bestimmung dieser Parameter existieren im Wesentlichen zwei unterschiedliche Herangehensweisen.

1. Besteht kein oder nur unzureichendes Vorwissen über die zu modellierenden Zusammenhänge von Zuständen, Übergängen und Observationen wird im Allgemeinen ein Ansatz gewählt, der eine sukzessive Variation einzelner Attribute des Initialmodells (Topologie, Anzahl der verborgenen Zustände, Ordnung des Modells) vorsieht. Um dabei das Erreichen lokaler Maxima

im Rahmen des Trainingsprozesses zu vermeiden wird eine Vielzahl⁷ an zufällig parametrisierten Initialmodellen trainiert und die resultierenden Modelle gegeneinander evaluiert [Boussemart, 2011].

2. Existiert hingegen Vorwissen (sog. Expertenwissen) ist dieses nach [Rabiner und Juang, 1994] [Rabiner, 1989] in der Parameterwahl entsprechend zu berücksichtigen. So lässt sich die Topologie beispielsweise oftmals bereits aus der Problemstellung ableiten. Die Art der Observationssymbole hingegen ergibt sich aus der zu modellierenden Signalcharakteristik. Die Anzahl der Observationssymbole steht oftmals in Zusammenhang mit der Anzahl der verfügbaren Trainingsdaten. Je mehr Observationssymbole vorhanden sind, desto höher gestaltet sich der Trainingsaufwand. Existieren nur wenige Trainingsdaten, besteht eine Alternative darin, die Vielfalt an Observationssymbolen durch entsprechende Aggregationsmaßnahmen zu reduzieren. Bei Verwendung von Expertenwissen als Grundlage für die Modellerstellung ist die Anzahl der Zustände im Allgemeinen determiniert durch ihre physikalische Bedeutung die diesen Zuständen zugewiesen wird. Grundsätzlich gilt, je höher die Anzahl der Zustände ist, desto genauer können die Trainingsdaten wiedergegeben werden [Boussemart und Cummings, 2008]. Insbesondere in Kombination mit einer unzureichenden Trainingsdatenmenge besteht hier jedoch die Gefahr des *Overfittings*, so dass in der nachfolgenden Anwendung des Modells Variationen des Operateurverhaltens durch das trainierte Modell nicht mehr erkannt werden können [Bishop, 2006] [Schliep, 2002]. Ferner ist zu bedenken, dass sich auch die Anzahl der Zustände unmittelbar auf den Trainingsaufwand und damit die erforderlichen Trainingsdaten auswirkt. Ist die Anzahl der Zustände hingegen zu gering, so resultiert dies darin, dass statistisch relevante Eigenschaften der Daten nicht mehr ausreichend abgebildet werden können.

Um die initiale Schätzung der Parameter in den Parametermatrizen (Π ; A ; B) zu verbessern empfiehlt [Rabiner und Juang, 1994] verschiedene Methoden. Sie umfassen beispielsweise eine manuelle Segmentierung der Observationssequenzen in die zu modellierenden Zustände und eine Ermittlung der relativen Häufigkeiten der Observationen in den Zuständen.

Die in den vorangegangenen Kapiteln (vgl. Kapitel 4, Kapitel 5) durchgeführte Analyse der zu modellierenden Indikatoraufgabe ist im Folgenden Ausgangsbasis, um ein Initialmodell unter Verwendung von Expertenwissen aufzustellen. Infolge der nur geringen Trainingsdatenmenge sind die freien Parameter des Modells weitmöglichst zu reduzieren. Für das Initialmodell ergibt sich damit:

- *Anzahl der Zustände:* Als verborgene Zustände des Modells werden die charakteristischen Teilaufgaben der Indikatoraufgabe („*recognise & tag*“, „*classify*“, „*insert result*“) gewählt. Sie sollen auf Basis durchgeführter manueller Aktionen des Operateurs erkannt werden.
- *Grad des Modells:* Aus der Analyse der Indikatoraufgabe (vgl. Kapitel 5.1.1.2) geht hervor, dass die Teilaufgaben, repräsentiert als Zustände des Modells, jeweils nur vom vorherigen Zustand (Teilaufgabe) abhängen, so dass hier eine Betrachtung von Hidden Markov Modellen 1. Ordnung erfolgen kann.
- *Topologie:* Die normative Ausprägung der zu modellierenden Indikatoraufgabe weist per se einen sequentiellen Verlauf auf. Diese wird am ehesten durch eine lineare Struktur (vgl. Abbildung 7.8) wiedergegeben. Sie ist charakterisiert durch Übergänge in den aktuellen und jeweils nächsten Zustand. Zeitliche Ausdehnungen in der Bearbeitung der Teilaufgaben werden dabei durch die Selbstübergänge (sog. *loops*) des linearen Modells abgebildet [Fink, 2003]. Weitere Zustandsübergänge hingegen existieren nicht. Damit reduziert sich die Anzahl der zu trainierenden Parameter, ebenso wie die erforderliche Trainingsdatenmenge [Knab, 2000].

⁷ Die Anzahl an verschiedenen Initialmodellen erfolgt dabei in Abwägung mit dem Berechnungsaufwand. Im Falle von [Boussemart, 2011] wurden hierfür 10000 verwendet.

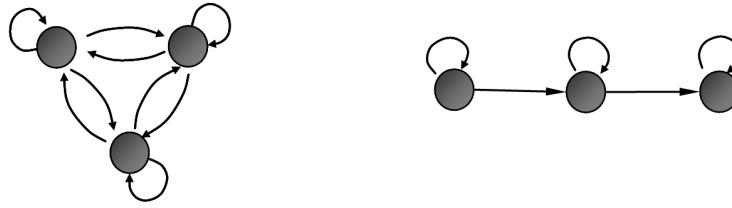


Abbildung 7.8: Ergodische (links) und lineare (rechts) Topologie für drei Zustände

- **Observationen:** Die Observationen in der zu modellierenden Aufgabe sind diskret. Es handelt sich um die semantisch attributierten, manuellen Interaktionen des Operators, die dieser bei der Bearbeitung der Aufgabe zeigt. Um die Merkmalsvielfalt infolge der limitierten Trainingsdatenmenge zu reduzieren, werden ähnliche Aktionen zusammengefasst (vgl. Abschnitt 7.6.2). Für die Führung von einem UAV ergeben sich damit insgesamt 13 verschiedene Observationssymbole (Tabelle 7.3).

Nummer	Observationssymbol
(1)	Move Map
(2)	Click HotSpot
(3)	Add Object
(4)	Select Target
(5)	CAM
(6)	Track Target
(7)	Center Object
(8)	Rotary Zoom In
(9)	Rotary Zoom Out
(10)	RECCE
(11)	Map Ground
(12)	Classification
(13)	Others

Tabelle 7.3: Observationssymbole

Abbildung 7.9 zeigt den Zusammenhang zwischen den verborgenen Zuständen und Observationssymbolen. Dieser basiert auf umfassenden Analysen der zu modellierenden Objektidentifizierungsaufgabe und repräsentiert die in der Bearbeitung der jeweiligen Teilaufgaben beobachteten Observationssymbole.

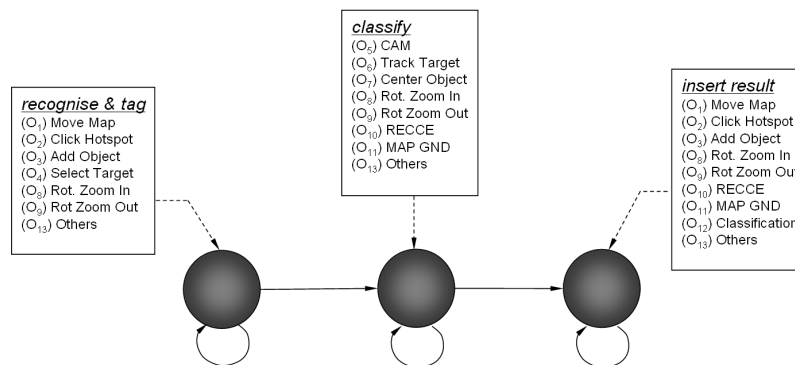


Abbildung 7.9: Zusammenhang zwischen verborgenen Zuständen und beobachtbaren Interaktionen für das Aufgabenmodell „Objektidentifizierung“

- *Wahl der initialen Parameter:* Die Wahl der initialen Parameter wird detailliert in Abschnitt 7.6.4 betrachtet.

7.6.3 Vorverarbeitung und Auswahl der Training- und Validierungsdatensätze

Die in der Experimentalkampagne aufgezeichneten manuellen Interaktionssequenzen dienen als Grundlage für die Modellerstellung (vgl. Kapitel 5). Diese können in ihrem vorliegenden Format jedoch nicht unmittelbar für das Training verwendet werden, sondern bedürfen zunächst verschiedener Vorverarbeitungsschritte.

Den Ausgangspunkt stellt zunächst ein Datensatz dar, der das im Rahmen der Missionsdurchführung vom Operateur geäußerte (Gesamt-)Verhalten umfasst. Aus diesem werden im ersten Schritt die Verhaltensdaten für die Durchführung der Indikatoraufgaben extrahiert. Aufbauend auf diesen segmentierten Datensätzen werden für das Training der Indikatoraufgabe unrelevante Daten wie beispielsweise Zeit-, Display-, Positionsinformationen eliminiert. Verbleibend sind somit Datensätze die semantisch attributierte Sequenzen an Einzelaktionen (z.B. Verschieben der Karte, Anwählen des Hotspots, Anwählen des Buttons Add Object) beinhalten. Infolge der lediglich limitierten Verfügbarkeit an Trainingsdatensätzen (vgl. Abbildung 7.10) ist es ferner erforderlich, die Dimensionen des Modells, darunter auch die Merkmalsvielfalt an verschiedenen Observationen, soweit möglich zu reduzieren. Demzufolge werden im nachfolgenden Schritt Informationen entsprechend aggregiert. So werden

1. kontinuierliche Aktionen, z.B. Verschieben der Karte, das Heranzoomen bzw. Herauszoomen zu einer einzigen Aktion zusammengefasst,
2. semantisch ähnliche Interaktionen wie beispielsweise SET-SAM, SET-JEEP und SET-CIVIL, zu einer Aktion (*Classification*) zusammengefasst.
3. Interaktionen, die in Folge unbeabsichtigter Betätigung entstehen und unmittelbar von der Versuchsperson wieder korrigiert werden (z.B. Fehlaktionen, Empty-Button, SYMB-Button, TRACK-Routepoint, INSERT-Routepoint, Move-Object, FMS-Button), in einem separaten Aktionstyp (*Others*) aggregiert.

Dieser aggregierte Datensatz wird anschließend in ein numerisches Format (vgl. Tabelle 7.3) für die Verarbeitung im Trainingsalgorithmus umgewandelt. Abschließend erfolgt eine Unterteilung der verfügbaren Verhaltensdatensätze in Trainings- und Testdatensätze.

Die Modellerstellung soll anhand der Datensätze erfolgen, bei denen die Versuchsperson die Indikatoraufgabe am häufigsten unter normalen Beanspruchungsbedingungen bearbeitet hat. Somit können die meisten zusammengehörigen Trainingsdatensätze für einen Trainingsdurchlauf angeboten werden. Abbildung 7.10 zeigt hierzu die Anzahl bearbeiteter Objekte durch die einzelnen Versuchspersonen, sowie die Anzahl der beobachteten *load-shedding* Strategien. Die Differenz aus verfügbaren Datensätzen und beobachteten *load-shedding* Strategien ergibt die Anzahl tatsächlich verfügbarer Trainingsdatensätze. Die maximale Anzahl an verfügbaren Trainingsdatensätzen liegt bei VP8 in der Führung von einem UAV vor. Diese werden in fünf zufällig gewählte Validierungsdatensätze (vgl. Anhang D), sowie 31 verbleibende Trainingsdatensätze (vgl. Anhang E) unterteilt.

	Anzahl klassifizierter Objekte (<i>Ingress</i>)	Anzahl klassifizierter Objekte (<i>HOA</i>)	Anzahl Load Shedding. Strategien (<i>Ingress & HOA</i>)	verfügbare Datensätze	Anzahl klassifizierter Objekte (<i>Ingress</i>)	Anzahl klassifizierter Objekte (<i>HOA</i>)	Anzahl Load Shedding Strategien (<i>Ingress & HOA</i>)	verfügbare Datensätze
VP5	22	8	5	22	13	5	7	11
VP6	21	6	4	23	11	4	0	15
VP7	24	10	1	33	19	8	3	24
VP8	27	11	2	36	19	7	4	22
	1UAV				3UAVs			

Abbildung 7.10: Übersicht über die Anzahl klassifizierter Objekte, beobachtete load-shedding Strategien und maximal verfügbare Datensätze für eine Modellerstellung

Im Folgenden werden diese Trainingsdatensätze verwendet, um mit Hilfe des Baum-Welch (EM) Algorithmus (Abschnitt 7.4.2) ein Modell für die normative Aufgabenbearbeitung der Indikatoraufgabe zu trainieren. Um den eingangs erwähnten Einfluss des Initialmodells im Rahmen der Modellerstellung zu demonstrieren, werden im weiteren Verlauf drei unterschiedliche Initialmodelle betrachtet.

7.6.4 Training der Modelle

Die im Folgenden betrachteten Ausgangsmodelle besitzen allesamt eine lineare Modelltopologie mit drei Zuständen. Doch zeichnen sich diese Modelle durch unterschiedliche Belegungen der initialen Zustands- und Emissionsmatrizen aus. Als Initialwerte der verschiedenen Zustands- und Emissionsmatrizen wurden folgende Ausgangskonfigurationen gewählt:

- *frequency-based*, d.h. auf der Basis einer Häufigkeitsanalyse der Trainingsdatensätze
- *uniform*, d.h. durch einheitliche Werte
- *random*, d.h. durch zufällige Werte.

Für das frequency-based Modell wird zunächst eine Häufigkeitsanalyse durchgeführt. Da sowohl Zustandsmatrix als auch die Emissionsmatrix entsprechende Initialwerte benötigen, ist zum Einen die Häufigkeit zu ermitteln, mit der verschiedene Emissionen in den einzelnen Zuständen auftreten. Sie werden als Parameter zur Initialisierung der Emissionsmatrix herangezogen. Zum Anderen ist die durchschnittliche Verweildauer in den einzelnen Zuständen zu ermitteln. Sie wiederum dienen als Initialparameter für die Zustandsmatrix.

Tabelle 7.4 zeigt die Ergebnisse der Häufigkeitsanalyse bezüglich der beobachtbaren Observationsymbole in den betrachteten Teilaufgaben *recognise & tag*, *classify*, *insert result* durch Versuchsperson VP8 in der Führung von einem UAV.

Observationen	recognise & tag	classify	insert result
move map	30,99%	0%	26,79%
click hotspot	31,40%	0%	27,38%
add object	14,46%	0%	0%
select target	15,7%	0%	0%
cam	0%	16,44%	0%
track target	0%	15,98%	0%
center object	0%	9,59%	0%
zoom in	2,07%	25,57%	3,57%
zoom out	0,83%	13,24%	0%
recce	0%	0,046%	20,83%
map ground	0%	15,53%	0%
classification	2,48%	0%	20,83%
others	2,07%	3,2%	0,6%

Tabelle 7.4: Häufigkeitsbetrachtung beobachteter Aktionen in den einzelnen Zuständen *recognise & tag*, *classify* und *insert result* für VP8 in der Führung von einem UAV

Zur initialen Belegung der Zustandsübergangsmatrix sollen in einem ersten Ansatz die jeweiligen Verweildauern in den einzelnen Zuständen herangezogen werden. Als Maß für die Verweildauer in den einzelnen Zuständen wird dazu die Anzahl der durchgeführten Aktionen vor dem Übergang in den jeweils nachfolgenden Zustand verwendet. Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 stellen die Häufigkeitsverteilungen der Anzahl durchgeführter Aktionen vor einem Zustandswechsel dar. Es zeigt sich, dass die Teilaufgaben *recognise & tag*, sowie *insert result* nur geringe Streuung aufweisen. In diesen Fällen lässt sich der Mittelwert als gute Näherung für die Initialbelegung der Zustandsmatrix verwenden. In der Teilaufgabe *classify* hingegen ist die Streuung deutlich höher. Hier wird erwartet, dass infolge der Streuung eine größere Adaption des Wertes im Rahmen des Trainings erfolgen wird.

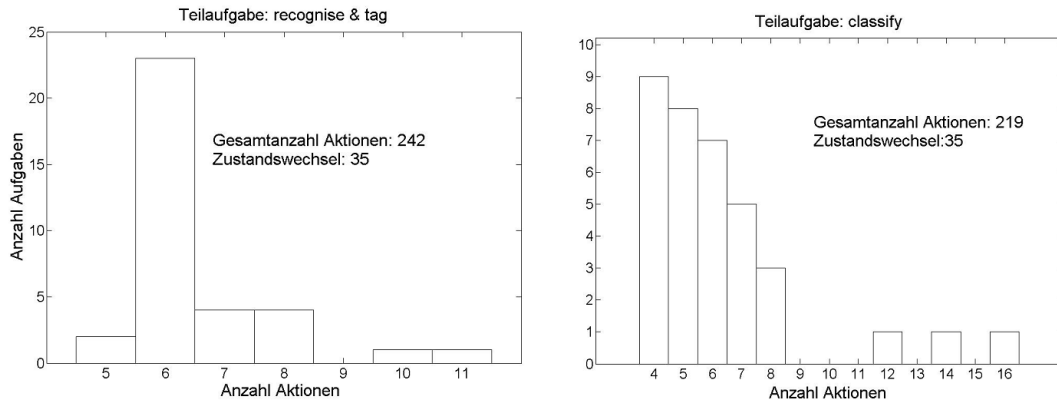


Abbildung 7.11: Analyse der Anzahl an Aktionen vor einen Zustandswechsel bezogen auf die Teilaufgaben *recognise & tag* ($N = 30$, $\mu = 6.54$, $\sigma = 1.244$) und *classify* ($N = 30$, $\mu = 6.26$, $\sigma = 2.76$)

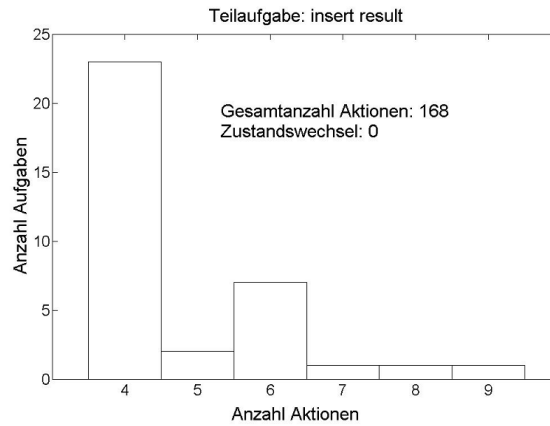


Abbildung 7.12: Analyse der Anzahl an Aktionen vor einen Zustandswechsel bezogen auf die Teilaufgabe *insert result* ($N = 30$, $\mu = 4.80$, $\sigma = 1,30$)

Abbildung 7.13 visualisiert die initialen Parameter von Zustands- und Emissionsmatrix basierend auf der durchgeführten Häufigkeitsanalyse. Die Zustandsübergangswahrscheinlichkeitsmatrix (Abbildung 7.13, links) zeigt die Wahrscheinlichkeiten für die Übergänge zwischen den Teilaufgaben. Die Wahrscheinlichkeit für einen Zustandsübergang ist dabei von links nach rechts zu „lesen“. Die Höhe der Balken repräsentiert die ermittelte Wahrscheinlichkeit für einen Zustandsübergang von einer Teilaufgabe in die nachfolgende Teilaufgabe. Im vorliegenden Fall zeigt sich, dass die Wahrscheinlichkeit im gleichen Zustand, und damit in der gleichen Teilaufgabe, zu verweilen deutlich höher ist, als die Wahrscheinlichkeit für einen Wechsel in die nachfolgende Teilaufgabe. Ist die Balkenhöhe und damit die Wahrscheinlichkeit für den Übergang in eine Teilaufgabe Null, existiert dieser Zustandsübergang nicht. Im Falle des hier betrachteten linearen Modells ist lediglich ein Zustandsübergang in die gleiche Teilaufgabe (z.B. von *recognise & tag* auf *recognise & tag*), oder aber in die nachfolgende Teilaufgabe (z.B. von *recognise & tag* auf *classify*) möglich, nicht jedoch z.B. von *recognise & tag* auf *insert result*. Dies ist durch die initiale Modelltopologie determiniert. Nachdem die hier betrachtete Indikatortask mit Eintragen des Ergebnisses in das System endet (vgl. Kapitel 5.1.1.2) existiert hier kein weiterer Zustandsübergang. Die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang von *insert result* nach *insert result* ist demzufolge 100%.

Die Emissionswahrscheinlichkeitsmatrix (Abbildung 7.13, rechts) zeigt die in den Teilaufgaben beobachteten Observationssymbole. Die Höhe der Balken repräsentiert die Wahrscheinlichkeit für das entsprechende Observationssymbol in der jeweiligen Teilaufgabe. Ist die Balkenhöhe Null wurde das entsprechende Observationssymbol in den entsprechenden Teilaufgaben im Rahmen der Häufigkeitsanalyse nicht beobachtet.

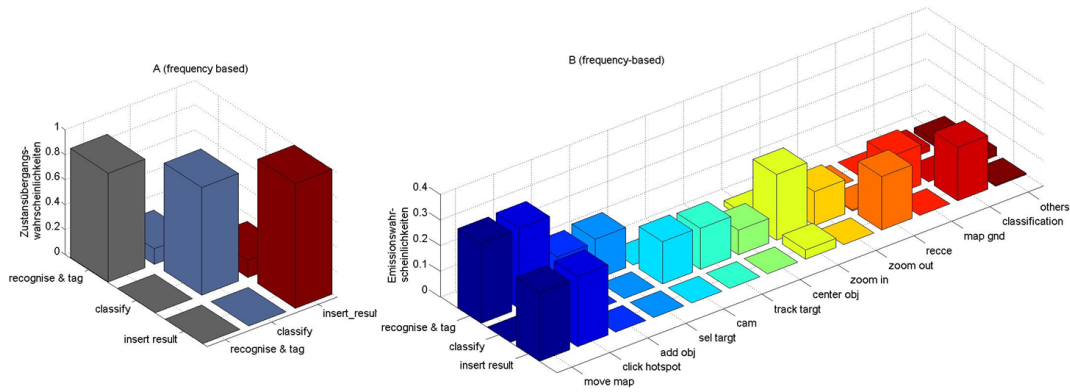


Abbildung 7.13: Initialparameter der Zustands- und Emissionsmatrix im Betrachtungsfall *frequency-based*

In Hinblick auf das Training der Initialmodelle ist zu berücksichtigen, dass Initialwerte mit dem Wert Null im Rahmen des Trainings nicht weiter angepasst werden. Während dies im Fall der Zustandsübergangsmatrix gewünscht ist, um die initiale Modelltopologie zu erhalten, besteht für Emissionsmatrizen die Gefahr, die Adaptionfähigkeit des Models für unbekannte Trainingsdaten zu limitieren. Um hier eine Flexibilität im Rahmen des Trainings zu erhalten, ist es sinnvoll diese Werte durch einen Minimalwert zu ersetzen. Dieses Vorgehen wird als „*flooring*“ bezeichnet [Fink, 2003]. Es ermöglicht diese Werte im Rahmen des Trainings bei Eintreten des Observationssymbols weiterhin zu adaptieren.

Abbildung 7.14 und Abbildung 7.15 visualisieren ergänzend die Initialwerte für die einheitliche und zufällige Initialisierung von Zustands- und Emissionsmatrix.

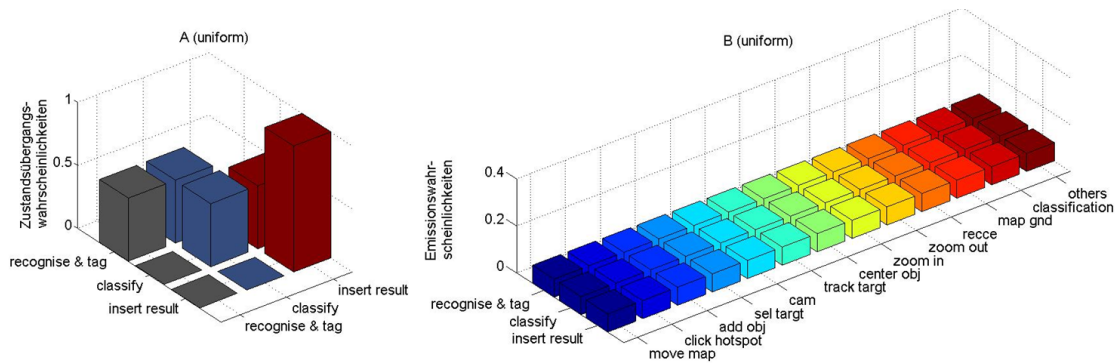
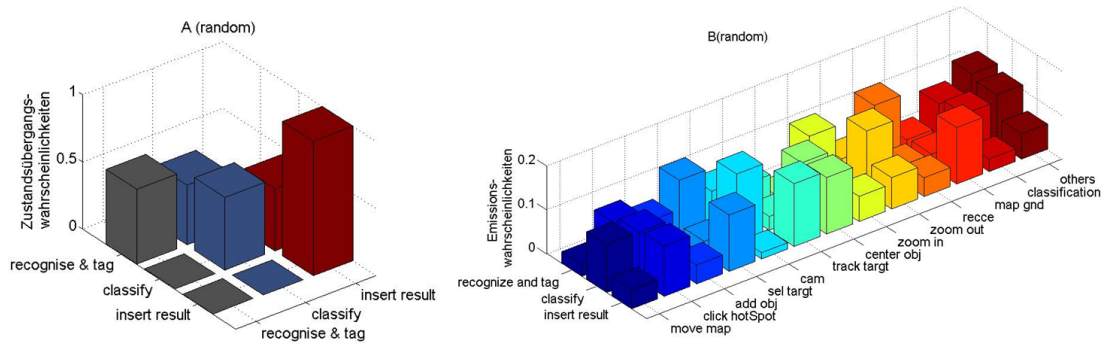


Abbildung 7.14: Initialparameter der Zustands- und Emissionsmatrix im Betrachtungsfall *uniform*


 Abbildung 7.15: Initialparameter der Zustands- und Emissionsmatrix im Betrachtungsfall *random*

Training der verschiedenen Ausgangsmodelle

Das Training erfolgt unter Verwendung des Baum-Welch-Algorithmus (vgl. Abschnitt 7.4.2). Als Konvergenzkriterium wird der Logarithmus der Produktionswahrscheinlichkeit ($\log[P(O|\lambda)]$) („*log-likelihood*“) verwendet. Die Verwendung der *log-likelihood* Werte wurde gewählt, um die Verarbeitung sehr kleiner numerischer Wahrscheinlichkeitswerte infolge der Sequenzlängen zu vermeiden. Hierfür wird in jedem Iterationsschritt die logarithmische Produktionswahrscheinlichkeit sowohl für das Ausgangsmodell (λ), als auch das Modell mit den neu geschätzten Parameterwerten ($\hat{\lambda}$) berechnet. In der Verwendung mehrerer Beobachtungssequenzen erfolgt die Berechnung von $\log[P(O|\lambda)]$ nach [Wichern, 2001] wie folgt:

$$\log(L(\lambda)) := \log(P(O|\lambda)) = \sum_{k=1}^K \log(P(O^k|\lambda)) \quad (7.41)$$

Die Iteration des Algorithmus wird so lange aufrecht erhalten, bis die Differenz einen definierten Schwellwert ϵ unterschreitet. Als Schwellwertgrenze für diese Arbeit wurde $\log[P(O|\hat{\lambda})] - \log[P(O|\lambda)] < \epsilon$ mit $\epsilon = 0.001$ verwendet.

Aufgrund der a-priori Festlegung von Modelltopologie, Anzahl der Zustände, sowie Ordnung des Initialmodells wird dieser Lernprozess der Modelle nach [Bishop, 2006] als „überwachtes Lernen“ eingestuft⁸.

Ergebnisse des Trainingsprozesses

Abbildung 7.16 zeigt die Anzahl erforderlicher Iterationsschritte, die die unterschiedlichen Initialmodelle benötigen, um das Konvergenzkriterium zu erreichen. Gleichzeitig wird über den *log-likelihood*-Wert veranschaulicht, wie gut die Modelle die Trainingsdaten repräsentieren. Grundsätzlich gilt, je geringer dieser Wert, desto besser repräsentiert das Modell die Trainingsdaten.

Die Abbildung verdeutlicht, dass das Initialmodell basierend auf der Häufigkeitsanalyse bereits nach wenigen Iterationsschritten (3) konvergiert und eine konstante Performanz erreicht. Mehr Iterationsschritte und damit eine höhere Anpassung der Parameter der Matrizen benötigen hingegen die Modelle mit einheitlicher (*uniform*) und zufälliger (*random*) Initialisierung. Dies spiegelt sich auch in der Adaption der einzelnen Parameter der beiden Matrizen wider. Beiden Initialmodellen gelingt es trotz gesteigerter Anzahl an Iterationen hierbei nicht, die Performanz des *frequency-based* Modells zu erreichen⁹.

⁸ Als „unüberwachtes Lernen“ wird der Vorgang nur bezeichnet, wenn das Modell (Struktur als auch Werte) ohne Vordefinitionen, d.h. ausschließlich auf Basis der in den Trainingsdaten enthaltenen Informationen entsteht.

⁹ Es ist jedoch anzumerken, dass im Falle zufälliger Initialisierung (*random*) unter Umständen auch deutlich höhere Performanzwerte erreicht werden können [Boussemart, 2011]. Boussemart exploriert hierzu eine sehr hohe Anzahl von Initialmodellen.

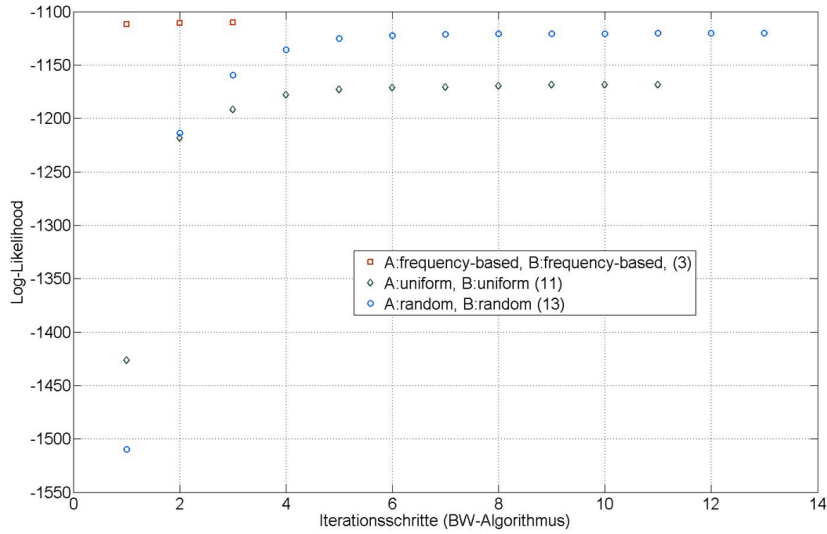


Abbildung 7.16: Training der unterschiedlichen Initialmodelle unter Verwendung des Baum-Welch-Algorithmus

Die nachfolgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse des Trainings für die Zustandsübergangsmatrizen der hier betrachteten unterschiedlichen Ausgangsmodelle *frequency-based*, *uniform* und *random* zusammen.

Hierzu finden sich die initial definierten Zustands- und Emissionsmatrizen den trainierten Zustands- und Emissionsmatrizen graphisch gegenüber gestellt, mit dem Ziel die Adaption der Initialmodelle an die Trainingsdaten bei unterschiedlichen Ausgangsvoraussetzungen zu demonstrieren.

Wie sich bereits an der Anzahl erforderlicher Iterationsschritte im Training zeigt, werden die einzelnen Werte von Zustands- und Emissionsmatrix im häufigkeitsbasierten Fall nur mehr geringfügig adaptiert um die Trainingsdatenmenge bestmöglich zu repräsentieren. Dies spiegelt sich auch in den graphischen Repräsentationen der trainierten Zustands- und Emissionsmatrizen wieder, die kaum einen Unterschied erkennen lassen.

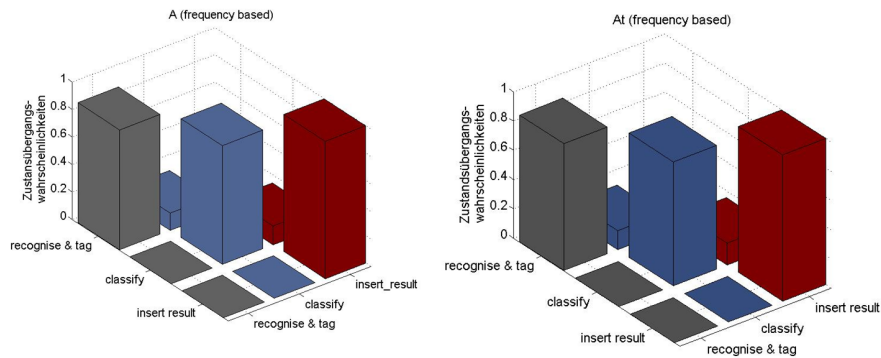


Abbildung 7.17: Zustandsübergangsmatrizen (Initial (A_i) & trainiert (A_{t_i})) - *frequency-based*

Das tatsächlich eine Adaption der Werte im Rahmen des Trainings stattfand, zeigt sich am ehesten in den numerischen Einzelwerten. Exemplarisch sind diese Werte für die Zustandsübergangsmatrizen aufgeführt. Sie lassen sich infolge ihrer Größe noch übersichtlich gegenüber stellen und damit

vergleichen. Die Werte der Emissionsmatrizen finden sich hingegen für alle untersuchten Modellkonfigurationen im Anhang F.

A_f	S_1	S_2	S_3	A_{t_f}	S_1	S_2	S_3
S_1	0.8736	0.1264	0	S_1	0.8675	0.1325	0
S_2	0	0.8622	0.1378	S_2	0	0.8483	0.1517
S_3	0	0	1	S_3	0	0	1

Abbildung 7.18: Zustandsübergangsmatrizen (initial (A_f) & trainierte (A_{t_f})) - *frequency-based*, mit S_1 : recognise & tag, S_2 : classify, S_3 : insert result

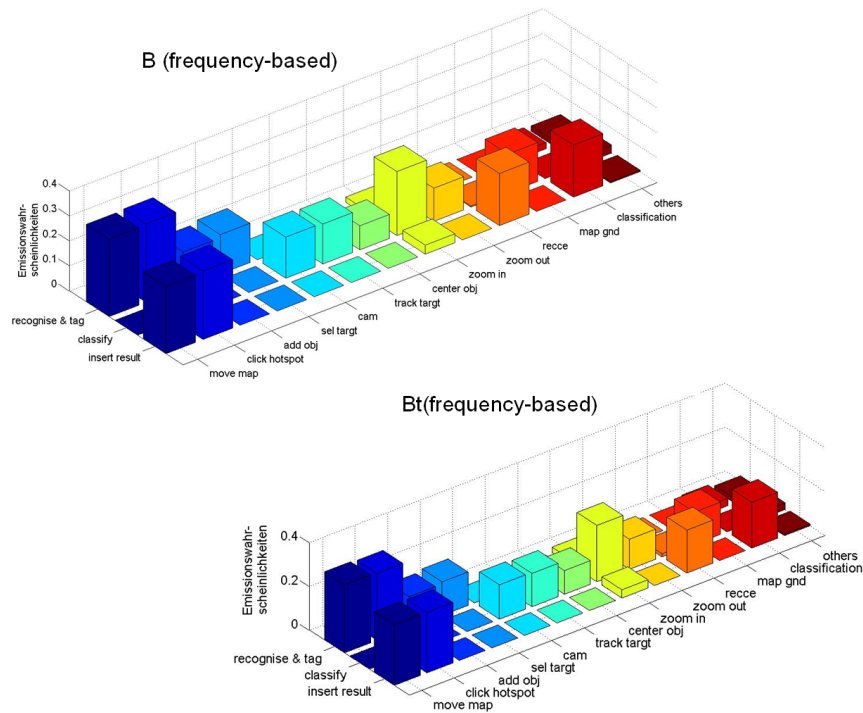


Abbildung 7.19: Zustandsübergangsmatrizen (Initial (B) & trainiert (Bt)) - *frequency-based*

Deutlich sichtbarer sind die Adaptionen der einzelnen Parameterwerte hingegen für die Modellkonfigurationen uniform und random. Während die Adaption in der frequency-based Konfiguration bei maximal $\pm 1.39\%$ der ursprünglichen Werte lag, erfolgt im Fall uniform eine maximale Anpassung einzelner Parameterwerte von ± 26.48 , im Falle des zufällig initialisierten Modells (random) sogar bei ± 31.14 . Die Adaption beider Modellvarianten findet sich sowohl graphisch als auch numerisch in den nachfolgenden Abbildungen repräsentiert.

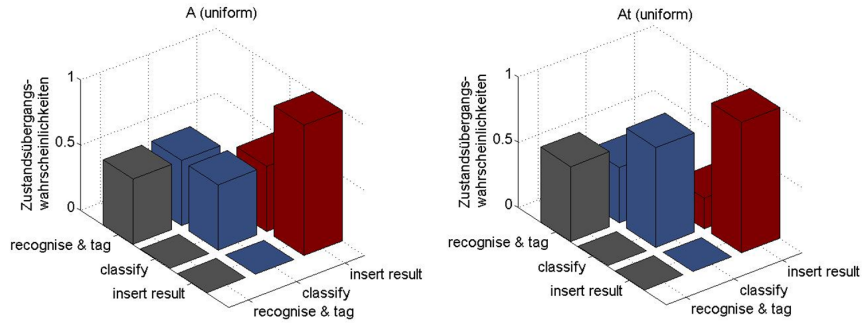


Abbildung 7.20: Zustandsübergangsmatrizen (initial (A_u) & trainiert (A_{t_u})) - *uniform*

A_u	S_1	S_2	S_3
S_1	0.5	0.5	0
S_2	0	0.5	0.5
S_3	0	0	1

A_{t_u}	S_1	S_2	S_3
S_1	0.5750	0.4250	0
S_2	0	0.7648	0.2352
S_3	0	0	1

Abbildung 7.21: Zustandsübergangsmatrizen (initial ($A_{uniform}$) & trainierte ($A_{t_{uniform}}$) Zustandsübergangsmatrix) - *uniform*, mit S_1 : recognise & tag, S_2 : classify, S_3 : insert result

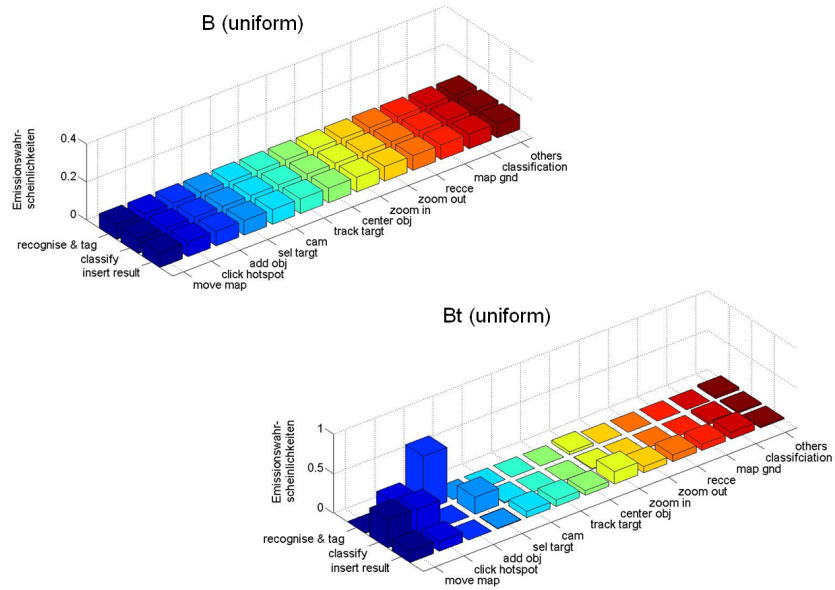
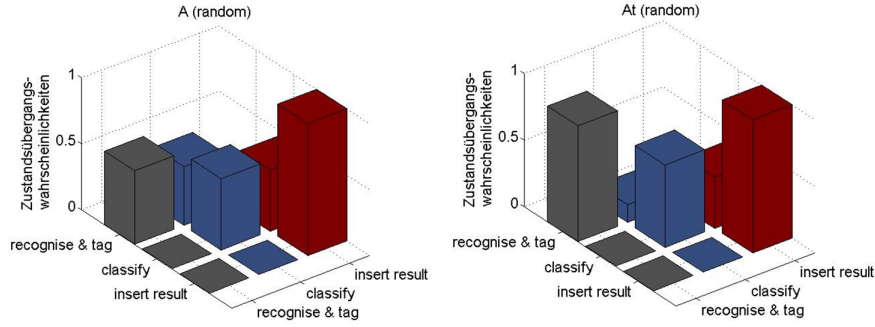
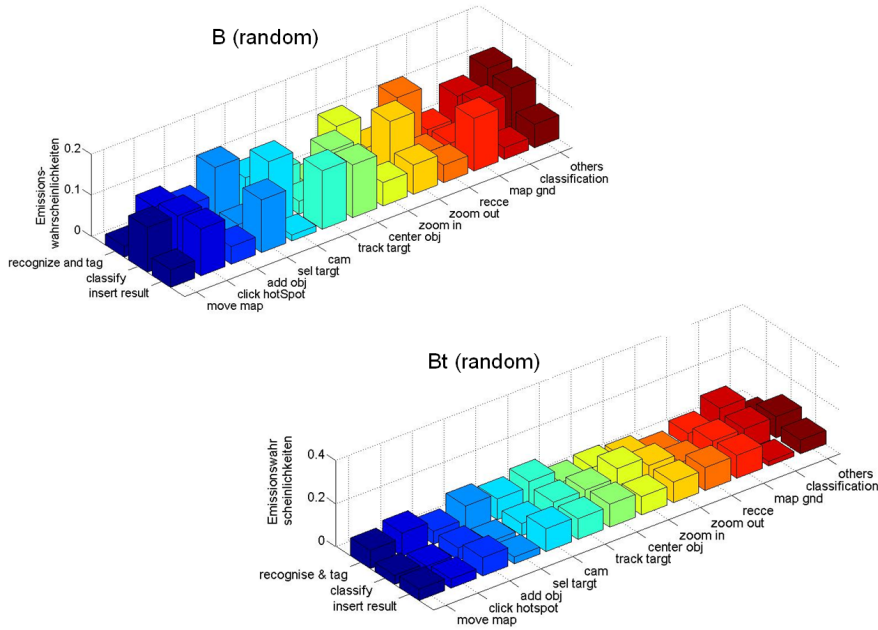


Abbildung 7.22: Zustandsübergangsmatrizen (initial (B) & trainiert (B_t)) - *uniform*


 Abbildung 7.23: Zustandsübergangsmatrizen (initial (A_r) & trainiert (A_{t_r})) - *random*

A_r	S_1	S_2	S_3
S_1	0.5556	0.444	0
S_2	0	0.5385	0.4615
S_3	0	0	1

A_{t_r}	S_1	S_2	S_3
S_1	0.8670	0.1330	0
S_2	0	0.6170	0.3830
S_3	0	0	1

 Abbildung 7.24: Zustandsübergangsmatrizen (initial (A_{random}) & trainierte ($A_{t_{random}}$) Zustandsübergangsmatrix) - *random*, mit S_1 : recognise & tag, S_2 : classify, S_3 : insert result

 Abbildung 7.25: Zustandsübergangsmatrizen (initial (B) & trainiert (Bt)) - *random*

Grundsätzlich zeigt sich, dass trotz gleicher Trainingsdaten die trainierten Zustands- und Emissionsmatrizen nicht das gleiche Ergebnis erreichen. Dies ist auf den verwendeten Trainingsalgorithmus zurückzuführen, dem es lediglich gelingt ein lokales Optimum zu erreichen [Schenk und Rigoll, 2010] [Wichern, 2001]. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Konfigurationen

uniform und *random* ein jeweils unterschiedliches lokales Extremum im Trainingsprozess erreicht haben.

Um dieser bekannten Problematik, der Konvergenz in ein lokales Optimum entgegen zu wirken, existieren im Wesentlichen zwei unterschiedliche Herangehensweisen. So wird oftmals eine Vielzahl an unterschiedlichen Initialmodellen trainiert um lokale Maxima zu überwinden und letztendlich ein Modell zu erhalten, das die Trainingsdaten bestmöglich repräsentiert. Alternativ kann auch der Trainingsalgorithmus an sich verändert werden. So erweitert [Wichern, 2001] beispielsweise den Baum-Welch-Algorithmus dahingehend, dass bei Erreichen eines (lokalen) Optimums die Parameter des Modells entsprechend gestört werden, um so einen benachbarten Punkt im Parameterraum zu erlangen, der dann wieder als Ausgangspunkt für weitere Baum-Welch-Iterationen genutzt wird.

Da im Rahmen dieser Arbeit zunächst einmal die Überprüfung der Eignung der Methode für die Erkennung von aufgabenspezifischen Verhalten im Vordergrund steht, nicht jedoch die Optimierung des Lernverfahrens, soll dieser Aspekt im Folgenden nicht weiter vertieft werden.

Vielmehr soll demonstriert werden, inwiefern es den trainierten Modellen gelingt, die vom Operateur bearbeitete Teilaufgabe der Indikatoraufgabe ausschließlich auf Basis beobachtbarer manueller Interaktionen zu erkennen. Als Beobachtungsdaten sollen hierfür die im Vorfeld vom Trainingsprozess ausgrenzten Evaluierungsdatensätze verwendet werden (vgl. Anhang D). Die Vorgehensweise dazu wird im nächsten Abschnitt genauer erläutert.

7.6.5 Modellvalidierung durch Erkennung der Aufgabensituation

Das Erreichen eines Konvergenzkriteriums ist per se noch kein Garant dafür, dass es diesen Modellen gelingt, auf Basis einer gegebenen Beobachtungssequenz die zugrunde liegende Zustandssequenz korrekt zu erkennen. Hintergrund hierfür ist, dass sich die Konvergenz auch auf ein erreichtes lokales Maximum, deutlich entfernt von einem globalen Maximum beziehen kann. So besagt das Erreichen einer Konvergenz lediglich, dass in zwei aufeinander folgenden Iterationsschritten ein zuvor definierter Schwellwert nicht überschritten wird. Sie gibt jedoch keinen Anhaltswert inwiefern dabei ein Maximum nahe dem globalen Maximum erreicht wurde.

Im Folgenden werden unter Verwendung der Evaluierungsdatensätze sowie der trainierten Konfigurationen die zugrunde liegenden Zustandssequenzen ermittelt. Dieser Vorgang wird als *Dekodierung* 7.4.3 bezeichnet. Im Rahmen der Dekodierung wird a-posteriori für jede zum Zeitpunkt t durchgeführte Aktion ein verborgener Zustand, hier repräsentiert als Teilaufgabe der Indikatoraufgabe (*recognise & tag*, *classify*, *insert result*) ermittelt. Durch die erfolgreiche Dekodierung der Evaluierungsdatensätze soll der Nachweis geführt werden, dass das **Modell in der Lage ist, in der Anwendung die vom Operateur momentan bearbeitete Teilaufgabe zu erkennen**.

Erkennungsleistung der Evaluierungsdatensätze von VP8

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 7.26 bis Abbildung 7.30) zeigen die Erkennung der Teilaufgaben durch das trainierte Modell (frequency-based) für die zuvor ausgewählten Evaluierungssequenzen. Der obere Teil der Abbildungen stellt dabei die Sequenz der vom Operateur im Rahmen der Aufgabenbearbeitung geäußerten manuellen Interaktionen dar. Der untere Teil der Abbildungen zeigt zu jeder geäußerten Aktion die vom trainierten Modell ermittelte Teilaufgabensituation. Die in den Abbildungen enthaltenen roten Markierungen kennzeichnen den vom Modell identifizierten Wechsel der Teilaufgaben. Auf Basis der Aufgabenanalyse (vgl. Kapitel 5) erfolgt der Wechsel von „*recognise & tag*“ in „*classify*“ durch Aktivierung des CAM-Mode (abgekürzt CAM). Dieser Mode stellt die notwendigen Funktionalitäten für die Klassifizierung des zuvor entdeckten und markierten Objektes zur Verfügung. Die Teilaufgabe „*classify*“ hingegen gilt mit dem Wechsel zurück in den RECCE-Modell (abgekürzt RECCE) als beendet.

Für das frequency-based Modell zeigt sich, dass unabhängig von der Anzahl durchgeführter Aktionen, sowie darin enthaltenen situationsangepassten und fehlerhaften Aktionen, in den getesteten

Evaluierungssequenzen zu jedem Zeitpunkt die korrekte Teilaufgabensituation, sowie der entsprechende Wechsel der Teilaufgaben einwandfrei durch das Modell erkannt wurden.

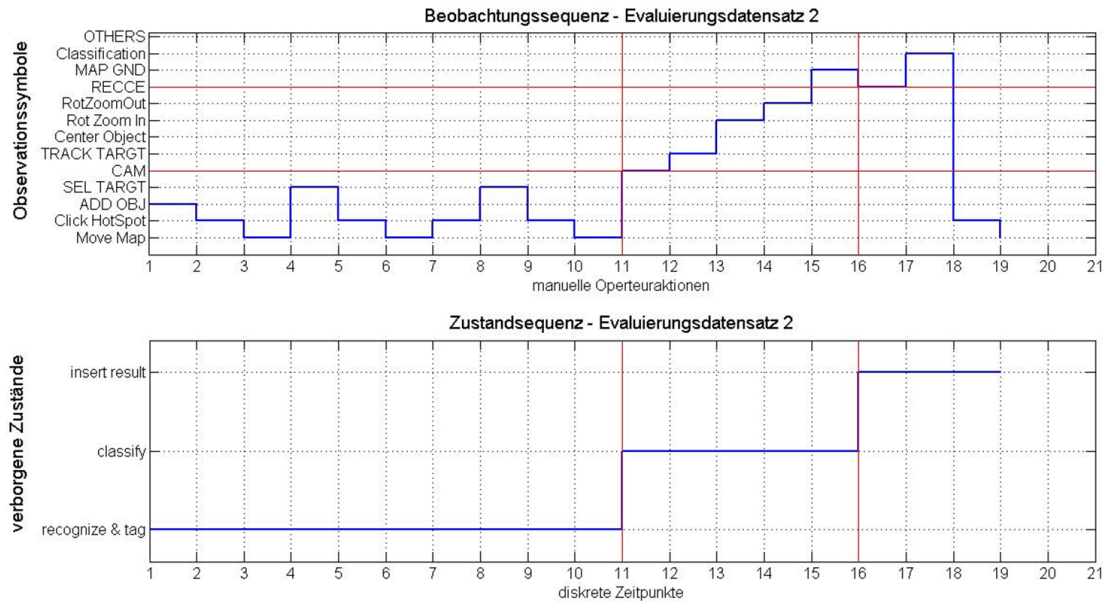


Abbildung 7.26: A-posteriori Ermittlung der zugehörigen Teilaufgaben für den Evaluierungsdatensatz2 für das Modell *frequency-based*

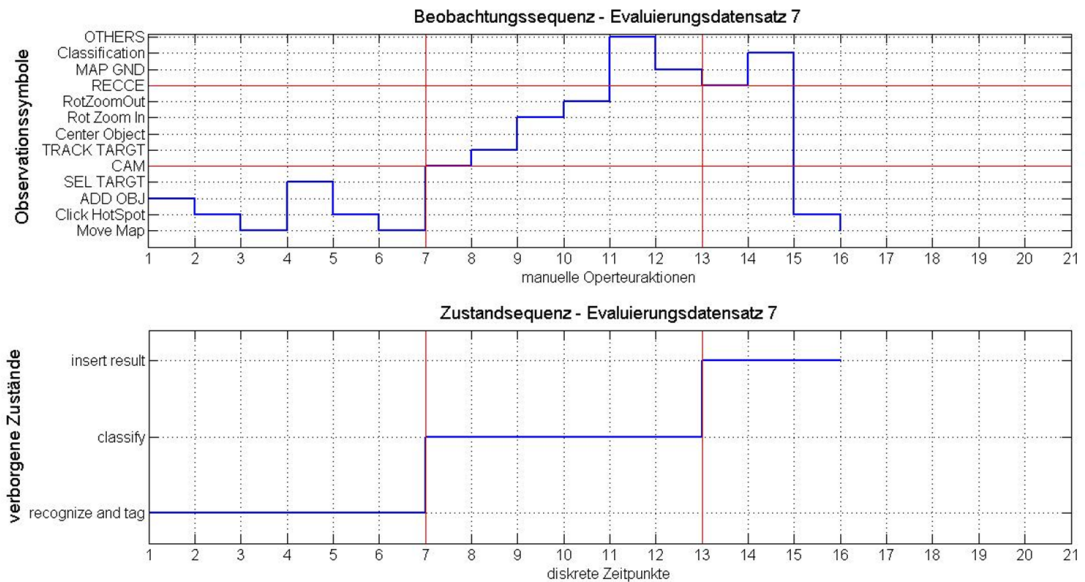


Abbildung 7.27: A-posteriori Ermittlung der zugehörigen Teilaufgaben für den Evaluierungsdatensatz7 für das Modell *frequency-based*

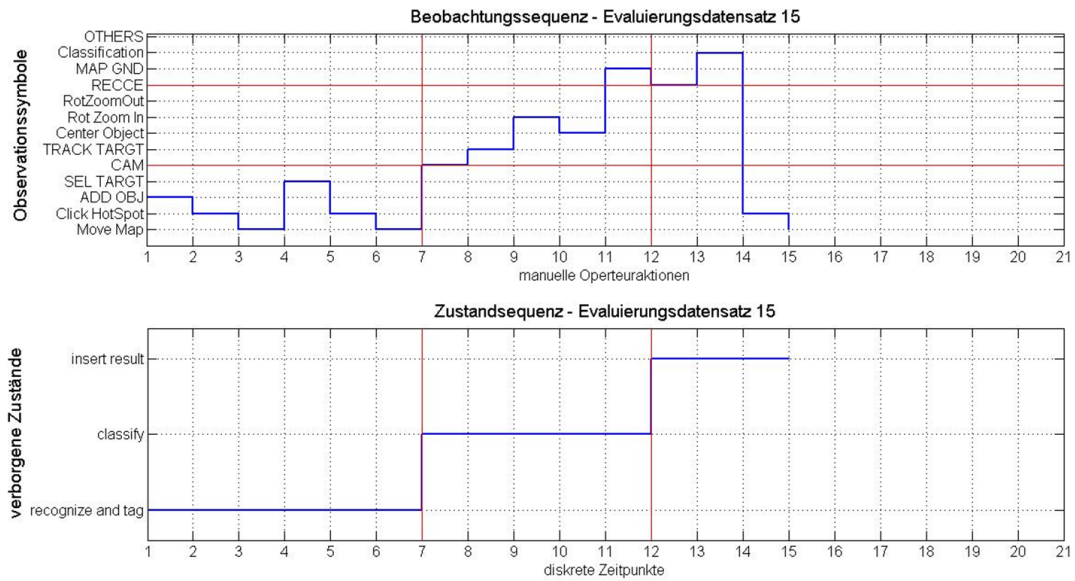


Abbildung 7.28: A-posteriori Ermittlung der zugehörigen Teilaufgaben für den Evaluierungsdatensatz15 für das Modell *frequency-based*

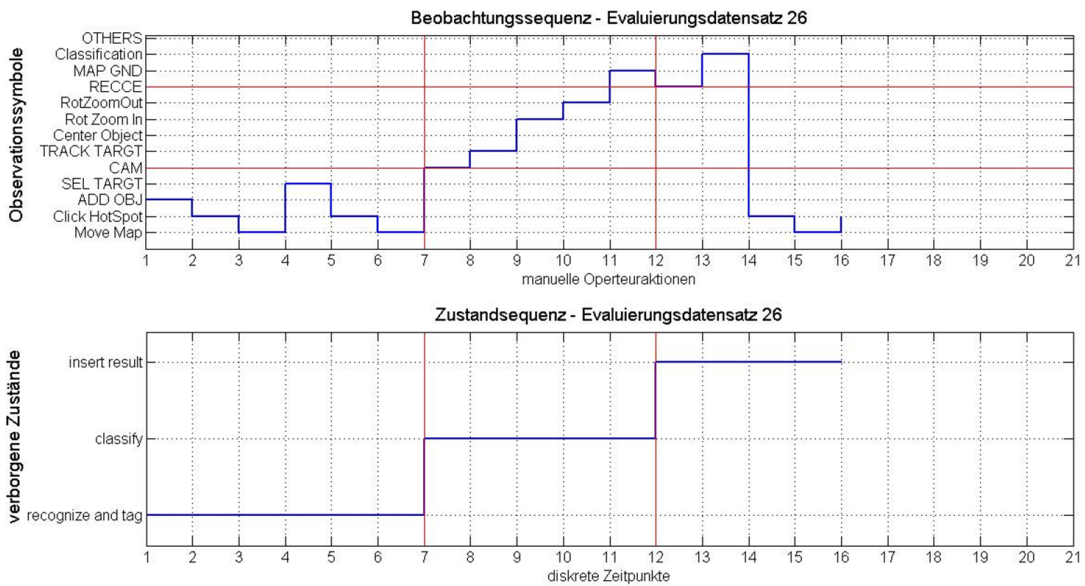


Abbildung 7.29: A-posteriori Ermittlung der zugehörigen Teilaufgaben für den Evaluierungsdatensatz26 für das Modell *frequency-based*

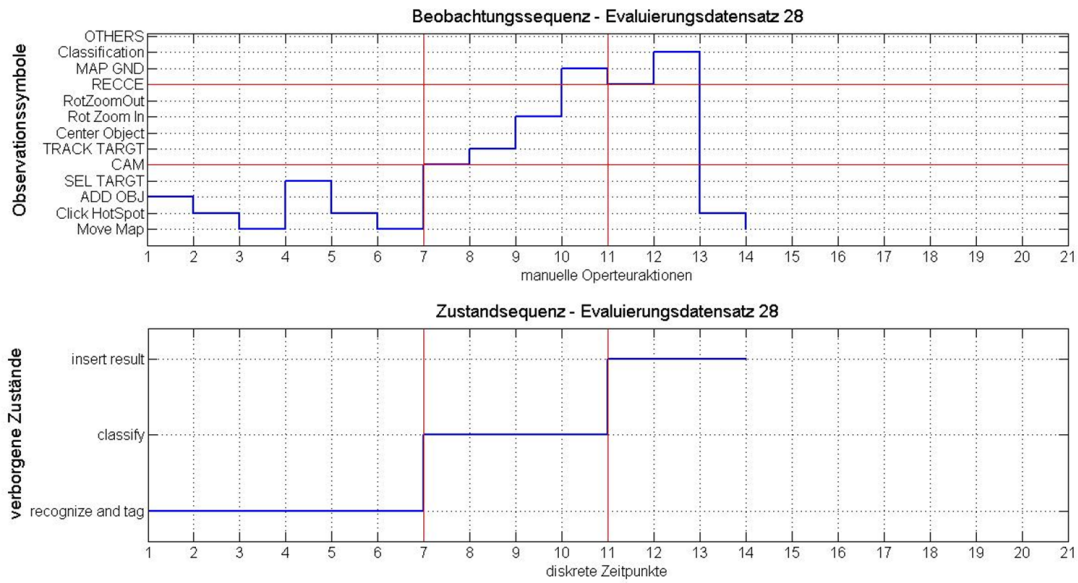


Abbildung 7.30: A-posteriori Ermittlung der zugehörigen Teilaufgaben für den Evaluierungsdatensatz 28 für das Modell *frequency-based*

Betrachtet man darüber hinaus die beiden anderen Konfigurationen (*uniform* und *random*), die im Rahmen des Trainings ebenfalls das Konvergenzkriterium erreicht haben, zeigt sich, dass diese im Gegensatz zum *frequency-based* Modell eine zum Teil deutlich reduzierte Erkennungsleistung aufweisen. Dabei erreicht das zufällig initialisierte Modell (*random*) nach dem Training eine Erkennungsquote der Teilaufgaben von um die 80%, wohingegen das einheitlich initialisierte Modell (*uniform*) mit lediglich um die 30% die schwächste Erkennungsleistung aufweist. Die einzelnen Erkennungsleistungen der Modelle für die unterschiedlichen Evaluierungssequenzen und Modelle sind in Tabelle 7.5 zusammengefasst.

EVALUIERUNGSSEQUENZ	ERKENNUNGSRATE		
	<i>frequency-based</i>	<i>uniform</i>	<i>random</i>
Evaluierungssequenz 2	100%	26,32%	89,47%
Evaluierungssequenz 7	100%	31,25%	75,0%
Evaluierungssequenz 15	100%	33,3%	80,0%
Evaluierungssequenz 26	100%	37,5%	81,25%
Evaluierungssequenz 28	100%	35,71%	85,71%

Tabelle 7.5: Erkennungsrate der verschiedenen Modelle für die einzelnen Evaluierungssequenzen

Die reduzierte Erkennungsleistung der Modelle *uniform* und *random* ist Folge einer fehlerhaften Abgrenzung der Teilaufgaben. Sie führt dazu, dass einzelne Aktionen falschen Teilaufgaben zugeordnet werden. Die Variation in der Erkennungsleistung resultiert aus den unterschiedlichen Sequenzlängen der verschiedenen Evaluierungssequenzen. Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen exemplarisch die Erkennungsleistung der Teilaufgaben für die Evaluierungssequenz 2 der Modelle *uniform* und *random*.

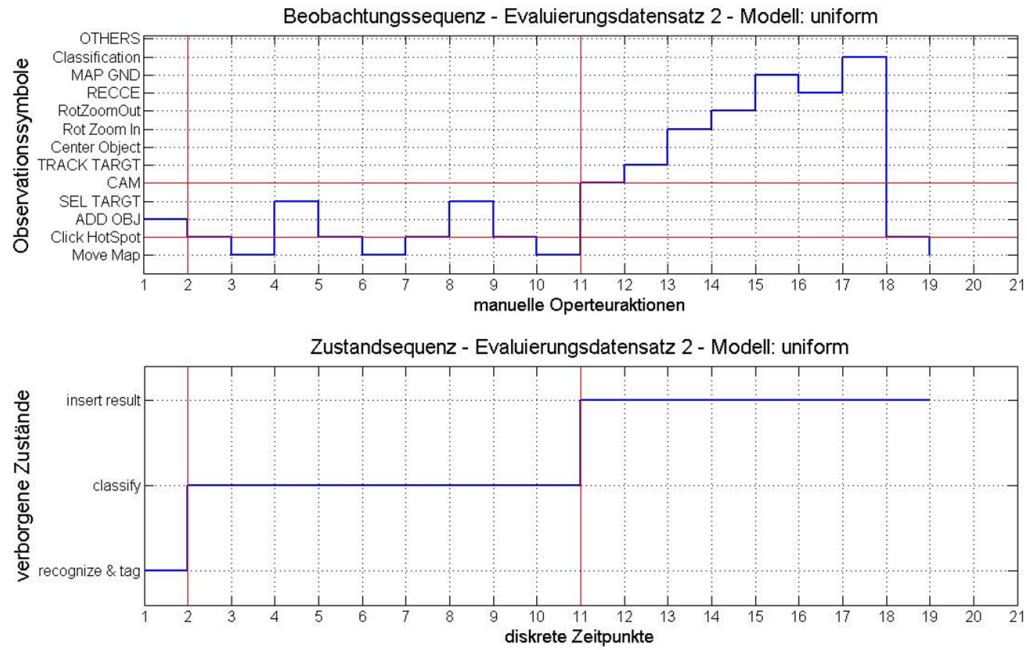


Abbildung 7.31: Teilaufgabenerkennung auf Basis der Aktionssequenz der Evaluierungsdatensequenz 2 für das trainierte Modell *uniform*

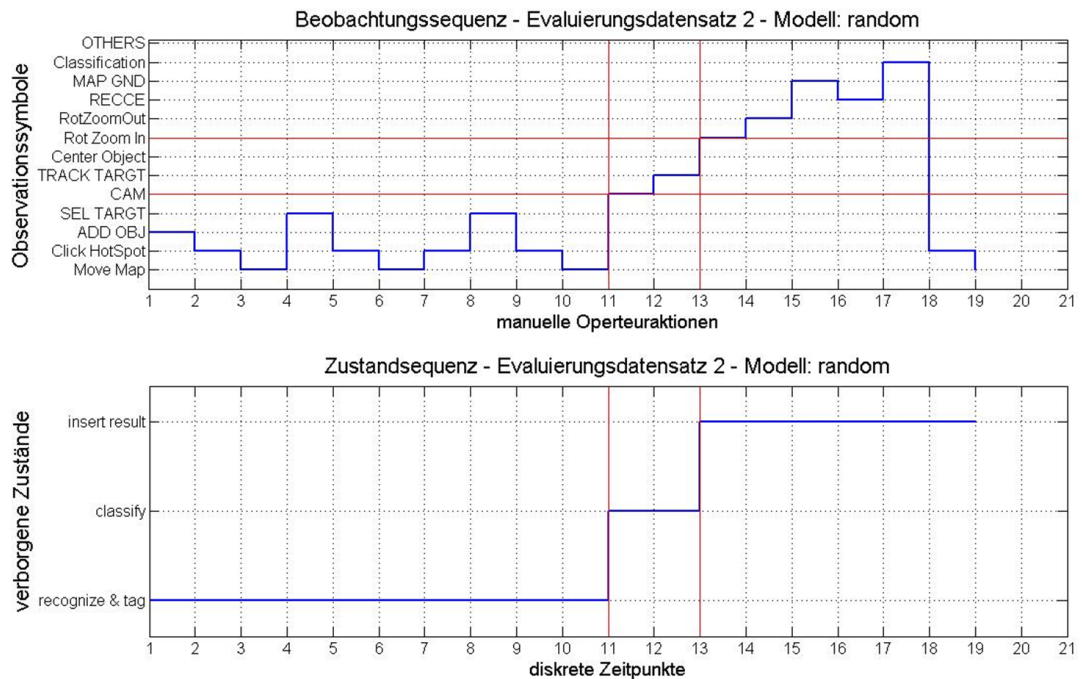


Abbildung 7.32: Teilaufgabenerkennung auf Basis der Aktionssequenz der Evaluierungsdatensequenz 2 für das trainierte Modell *random*

Erkennungsleistung des Modells für Versuchsperson VP6

Das Training der Modelle erfolgte mit Datensätzen der Versuchsperson VP8 (vgl. Abschnitt 7.6.3). Es stellt sich daher die Frage, wie gut das Verhalten einer Versuchsperson zugeordnet werden kann, deren Daten nicht am Training der Modelle beteiligt waren, obwohl das Verhalten individuell unterschiedliche Ausprägungen besitzt. Um dieses zu überprüfen wurde exemplarisch die Erkennungsleistung des für VP8 trainierten Modells (*frequency-based*) mit einer Sequenz der Durchführung der Indikatoraufgabe von VP6 getestet (vgl. Abbildung 30). Dabei zeigt sich, dass trotz anfänglich deutlich unterschiedlicher Bearbeitung der Indikatoraufgabe, die Teilaufgaben vollständig korrekt erkannt wurden, obgleich die zuvor deklarierten Trigger für einen Wechsel der Teilaufgaben (*CAM* und *RECCE*) bereits im Vorfeld infolge von Bedienfehlern des Operators verwendet wurden.

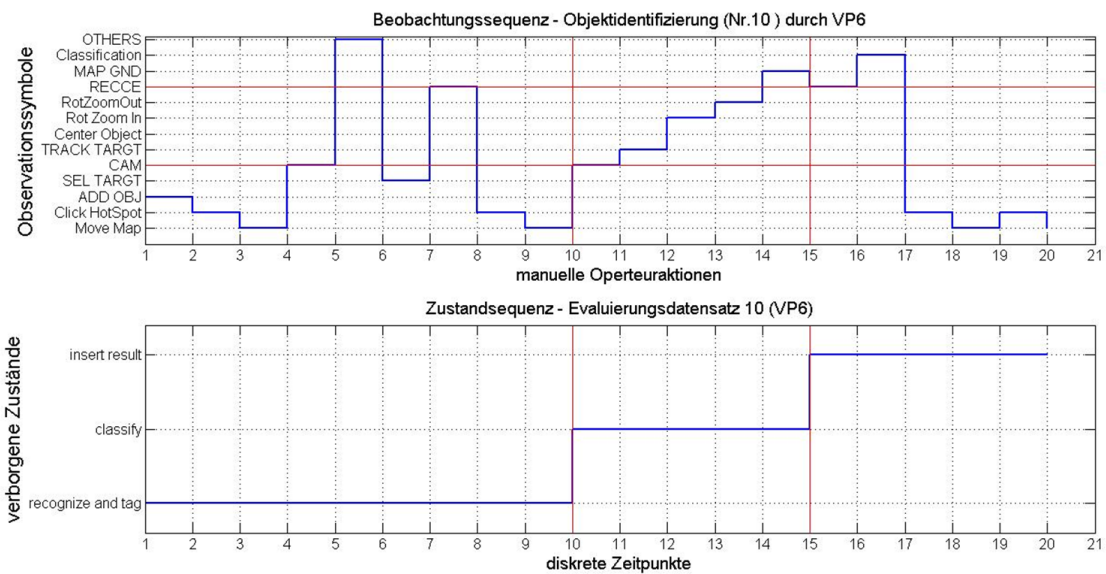


Abbildung 7.33: A-posteriori Teilaufgabenerkennung der Aktionsdatensequenz für Objekt 10 mit dem Modell „*frequency-based*“ für VP6

Ursache für diese korrekte Erkennungsleistung mag in der doch sehr strukturierten Bearbeitung der Teilaufgabe liegen, die in ihrer normativen Durchführung keine großen Freiheiten aufweist. Dies wird durch die Vorgabe der linearen Modelltopologie entsprechend unterstützt, die Zustandsübergänge jeweils nur in den gleichen, oder den nächstfolgenden Zustand zulässt. Beides führt dazu, dass trotz zum Teil erheblicher Streuungen infolge des situationsangepassten und zum Teil individuellen Verhalten für das frequency-based Modell eine gute Erkennungsleistung erzielt wird.

Resümee:

Um einem technischen System die Fähigkeit zu übertragen, ähnlich wie ein Mensch, durch Beobachtung seines Teammitgliedes auf die von ihm bearbeitete Aufgabe und durch die Art der Aufgabenbearbeitung auf seine Beanspruchung schließen zu können, benötigt das System Modelle, die diesen Zusammenhang zwischen Verhalten und Aufgabenbearbeitung abbilden können. Um diese Modelle zu erstellen ist es notwendig, die charakteristischen Verhaltensweisen des Menschen in der Bearbeitung der Aufgabe, die sich in den Interaktionen des Menschen mit dem System widerspiegeln, maschinell zu erlernen. Im zurückliegenden Kapitel wurde das dafür notwendige Vorgehen exemplarisch für eine spezifische Aufgabensituation, in diesem Fall für die Bearbeitung der Indikatoraufgabe unter normalen Beanspruchungsbedingungen, durchgeführt. Als maschinelles Lernverfahren wurden hierfür Hidden Markov Modelle verwendet. Diese Modellierungsmethode ermöglicht es, sowohl mit den charakteristischen Eigenschaften des zugrunde liegenden Opera-

teurverhalten umzugehen, als auch den Zusammenhang zwischen geäußertem Verhalten und Aufgabensituation abzubilden. Die dafür notwendige Präprozessierung der Daten und die geeignete Wahl eines erforderlichen Initialmodells erfolgte unter Verwendung entsprechenden Expertenwissens. Dieses Initialmodell wurde anschließend mit Hilfe experimentell gewonnener Verhaltensdaten einer Versuchsperson trainiert. Dazu wurden diese Daten in Trainings- und Testdatensätze unterteilt.

Das trainierte Modell wurde unter Verwendung der Testdatensätze validiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass auf Basis der Operateurinteraktionsdaten, d.h. durch Beobachtung von Operateurverhalten, ein Rückschluss auf die gegenwärtig bearbeitete Aufgabensituation, in diesem Fall die Teilaufgaben der Indikatoraufgabe, möglich ist. Ferner ließ sich diese Erkennungsleistung des trainierten Modells auch auf Datensätze fremder Versuchspersonen erfolgreich übertragen.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Dissertation beschäftigt sich mit der Beobachtung des Verhaltens von Piloten unter hoher Arbeitsbelastung, herbeigeführt durch die Führung mehrerer UAVs aus dem Cockpit heraus. Dabei konnte in umfangreichen Simulatorkampagnen beobachtet werden, dass die Versuchspersonen nicht, wie zunächst zu erwarten, mit einem starken Anstieg der subjektiven Beanspruchung reagieren, sondern sich durch sogenannte selbstadaptive Strategien im Verhalten an die Situation anpassen. Dies ermöglicht es ihnen, trotz hoher Arbeitsbelastung, die geforderte Leistung bei der Aufgabenbearbeitung im Wesentlichen aufrecht zu erhalten. Derartige charakteristische Verhaltensweisen, eben diese selbstadaptiven Strategien, konnten im Simulatorexperiment stimuliert, qualitativ beobachtet, quantitativ gemessen und dokumentiert werden. Darüber hinaus beschreibt diese Dissertation die Modellierung bestimmter, ausgewählter Verhaltensmuster in geschlossenen Rechnermodellen unter Verwendung eines maschinellen Lernverfahrens.

UAVs sind unbemannte Luftfahrzeuge, deren Führung und Einsatz durch hoch automatisierte Systemkomponenten bestimmt sind. Dazu ist vom Entwickler solcher Systeme zur Designzeit die Entscheidung zu treffen, welche Teilaufgaben in bestimmten Missionsphasen dem menschlichen Operateur beziehungsweise der Automation zu übertragen sind. Ein wichtiges Designkriterium ist dabei, den Menschen im Umgang mit einem derart automatisierten System nicht zu überfordern. Moderne Forschungskonzepte sehen hier eine flexible Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine unter Berücksichtigung der subjektiven Beanspruchung des Menschen vor. Gängige Ansätze, die die damit verbundenen wissenschaftlichen Fragestellungen untersuchen, sind unter dem Begriff der *Adaptiven Automation* bekannt. Wissensbasierte Assistenzsysteme, wie sie seit gut zwei Jahrzehnten am Institut für Flugsysteme der Universität der Bundeswehr München entwickelt und untersucht werden, stellen eine konkrete Implementation solcher Denkansätze dar. Eine wesentliche zu fordernde Fähigkeit solcher Systeme ist, dass sie in der Lage sind, zu erkennen, an welcher Aufgabe beziehungsweise Teilaufgabe der Operateur gerade arbeitet und ob er dabei möglicherweise überfordert ist, um dann aufgabenkontext- und beanspruchungsspezifisch unterstützend eingreifen zu können. Derzeit gehen weltweit verschiedene Forscher der Beantwortung dieser Fragestellung nach, ohne sie jedoch bislang letztlich befriedigend beantwortet zu haben. Ein weit verbreiteter, moderner Ansatz hierzu beruht auf der Verwendung neurokognitiver Messmethoden. Dieser geht davon aus, Aussagen über die „*Workload*“ aus der messbaren kortikalen Aktivität der Probanden ableiten zu können.

Diese Dissertation greift hierzu auf ein im Alltag beobachtbares Phänomen zurück. So gelingt es beispielsweise Fahrlehrern oder Fluglehrern, aber auch aufmerksamen Beifahrern oder Kopiloten auch komplett ohne Verwendung komplexer Messanlagen Rückschlüsse auf die subjektive

Beanspruchung des Schülers oder des Partners ziehen zu können. Diese Fähigkeit der Aufgaben- und Überforderungserkennung des Menschen basiert auf der genauen **Kenntnis** der jeweiligen **Arbeitsdomäne** und damit des jeweiligen **Aufgabenkontextes**, der nominalen **Interaktions-schritte** zur Bearbeitung dieser Aufgaben sowie entsprechend **individueller Vorgehensmodelle** der beobachteten Person. Der Rückschluss auf die Aufgaben- und Überforderung erfolgt unter Verwendung dieses Wissens, der **Beobachtung** des Gegenübers bei der Bearbeitung der Aufgaben und der damit möglichen **Detektion** von Anomalien im Verhalten. Dieses Phänomen ist die Grundlage für den in dieser Arbeit weiterentwickelten und untersuchten verhaltensbasierten Ansatz. Darin sollen dem wissensbasierten Assistenzsystem entsprechende Modelle über die Aufgaben und die Interaktionssequenzen bei der Aufgabendurchführung bereitgestellt werden. Diese Modelle sollen dabei sowohl das normative Verhalten ebenso wie verändertes Verhalten als Folge der Anwendung selbstadaptiver Strategien in Situationen hoher Arbeitslast und damit nahe der Überforderungsgrenze abbilden. Aufgabe des maschinellen Systems ist es schließlich, durch die Beobachtung des Verhaltens des Operators eine Abgrenzung zwischen normalem und verändertem Verhalten aufgabenspezifisch zu detektieren, welches dann Hinweise auf eine Überforderung liefern kann.

Hierzu wird in einem ersten Schritt normales Verhalten, d.h. das Verhalten unter normalen (d.h. mittleren bzw. mäßigen) Beanspruchungsbedingungen unter Verwendung von Hidden Markov Modellen im Rechner repräsentiert. Dafür werden zunächst ausschließlich manuelle Interaktionsdaten verwendet. Die experimentell erfassten visuellen Interaktionsdaten bleiben in dieser Betrachtung zunächst außen vor. Hintergrund hierfür sind die bislang noch mit unzureichender Qualität automatisch zu erfassenden Blickbewegungsdaten. Diese weisen selbst nach Korrektur und Nachbearbeitung eine sehr hohe Variabilität auf, welche das ohnehin statistisch äußerst problematisch konditionierte Training von Hidden Markov Modellen weiter erschweren würde. Bei entsprechender automatischer Fehlerkorrektur der Blickbewegungsmessungen sollte die Verwendung dieser wertvollen Interaktionsinformationen künftig jedoch keinesfalls als wertvolle Informationsquelle für die Modellbildung ausgeschlossen werden.

In dieser Arbeit gelingt der Nachweis, dass unter Verwendung des trainierten Modells und der Beobachtung der Interaktionssequenzen des Operators bestimmte Aufgaben und deren Unteraufgaben, repräsentiert durch die verborgenen Zustände des Modells, automatisiert wiedererkannt werden können. Damit sind die konzeptionellen, methodischen und algorithmischen Grundlagen für eine Systemkomponente eines wissensbasierten, adaptiven Assistenzsystems gelegt, welche in der Lage ist durch reine Verhaltensbeobachtung die Aufgabe und drohende Überforderungssituationen zu erkennen. Damit ist in dieser Arbeit der grundsätzliche Machbarkeitsnachweis gelungen.

Zur weiteren technischen Umsetzung und letztlich auch Validierung eines solchen Systems sind darüber hinaus anwendungsspezifische Aufgabensituationen, typische Verhaltensmuster und selbstadaptive Strategien zu untersuchen und entsprechende Rechnermodelle in der Breite zu erstellen. Um diese Modelle letztendlich in Assistenzsystemen anzuwenden und damit eine Erkennung von Überforderung während des laufenden Arbeitsprozesses zu realisieren, ist es ferner erforderlich entsprechende Realzeit- bzw. Closed-Loop-Eigenschaften der Implementierung weiter zu entwickeln. Darüber hinaus sollte neben der eigentlichen Erkennung dieser kritischen Beanspruchungssituation auch die durch eine Überforderungserkennung auszulösende Unterstützungsleistung des Systems eingehend betrachtet werden.

Generell betrachtet werden zukünftig Mensch-Maschine-Systeme, sei es in der Flugführung aber auch weit darüber hinaus, immer nutzeradaptiver werden. Ein wesentlicher Schlüssel hierzu wird die massive Nutzung impliziter Kommunikation zwischen Mensch und Maschine sein. Eine wesentliche Herausforderung dabei besteht darin, dass die Maschine, also der Computer erkennt und versteht, was gerade die Absichten des Nutzers sind und wie von diesem subjektiv die Arbeit mit

dem System empfunden wird. Hierzu bietet der hier unterbreitete verhaltensbasierte, auf Interaktionsbeobachtung aufgebaute Ansatz ein zugleich unaufdringliches und damit für den Bediener akzeptables Konzept und ein schier unerschöpfliches Potenzial für die Entwicklung benutzergerechter Produkte auf der Basis kognitionsergonomischer Methoden.

Literaturverzeichnis

- [Bailey u. a. 2006] BAILEY, N.R. ; SCERBO, M.W. ; FREEMAN, F.G. ; MIKULKA, P.J. ; SCOTT, L.A.: Comparison of a brain-based adaptive system and a manual adaptable system for invoking automation. In: *Human Factors* 48(4) (2006), S. 693–709
- [Bainbridge 1983] BAINBRIDGE, L.: Ironies of Automation. In: *Automatica* 19 (1983), S. 775–779
- [Banburry u. a. 2008] BANBURY, S. ; GAUTHIER, M. ; SCIPIONE, A. ; HOU, M.: Intelligent Adaptive Systems - Literature-Research of Design Guidance for Intelligent Adaptive Automation Interfaces / Defence R&D Canada (W7711-067983/001/TOR). 2008. – Forschungsbericht
- [Baxter und Horn 2005] BAXTER, J.W. ; HORN, G.S.: Controlling teams of uninhabited air vehicles. In: *Proceedings of the fourth international joint conference on autonomous agents and multiagent systems (AAMAS)*, 2005
- [Baxter u. a. 2008] BAXTER, J.W. ; HORN, G.S. ; LEIVERS, D.P.: Fly-by-Agent: Controlling a Pool of UAVs via a Multi-Agent System. In: *Applications and Innovations in Intelligent Systems XV - Proceedings of AI-2007, the 27th SGAI International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence*, 2008
- [Benes und Robertson 1999] BENES, R. ; ROBERTSON, G.: The Rotorcraft Pilot’s Associate Test Approach and Results for Boeing Simulation. In: *In Proceedings of the 55th American Helicopter Society International Annual Forum*, 1999
- [Beulen u. a. 1996] BEULEN, K. ; BRANSCH, E. ; KRAMER, M. ; NEY, H.: State-Typing für kontextabhängige Phonemmodelle. In: *In Proceedings: ITG-Fachtagung Sprachkommunikation*, 1996
- [Billings 1997] BILLINGS, C.E.: *Aviation automation - the search for a human-centered approach*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1997
- [Billings und Woods 1994] BILLINGS, C.E. ; WOODS, D.D.: *Human performance in automated systems: Current research and trends*. Kap. Concerns about adaptive automation in aviation systems, S. 264–269, Hillsdale, N.J., Lawrence Erlbaum Associates, 1994
- [Bishop 2006] BISHOP, C. M. ; JORDAN, M. (Hrsg.) ; KLEINBERG, J. (Hrsg.) ; SCHÖLKOPF, B. (Hrsg.): *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer Verlag, 2006
- [Blignaut 2009] BLIGNAUT, P.: Fixation identification: The optimum threshold for a dispersion algorithm. In: *Attention, Perception & Psychophysics* 71(4) (2009), S. 881–895
- [Bonner u. a. 2000] BONNER, M. ; TAYLOR, R. ; FLETCHER, K. ; MILLER, C.: Adaptive Automation and Decision Aiding in the Military Fast Jet Domain. In: *Proceedings of the Human Performance, Situation Awareness and Automation Conference, Savannah, GA*, 2000
- [Boussemart 2011] BOUSSEMARY, Y.: *Predictive Models of Procedural Human Supervisory Control Behavior*, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 2011

- [Boussemart und Cummings 2008] BOUSSEMARY, Y. ; CUMMINGS, M.L.: Behavioral recognition and prediction of an operator supervising multiple heterogeneous unmanned vehicles. In: *Proceedings of the first conference on Humans Operating Unmanned Systems (HUMOUS'08)*, 2008
- [Boussemart und Cummings 2011] BOUSSEMARY, Y. ; CUMMINGS, M.L.: Predictive models of human supervisory control behavioral patterns using hidden semi-Markov models. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* Volume 7, Issue 7 (2011), S. 1252–1262
- [Brakensieck 2002] BRAKENSIECK, A.: *Modellierungstechniken und Adaptionsverfahren für die On- und Off-Line Schrifterkennung*, Technische Universität München, Dissertation, 2002
- [Brezillon und Pomerol 1999] BREZILLON, P. ; POMEROL, J.-Ch.: Contextual Knowledge Sharing and Cooperation in Intelligent Assistant Systems. In: *Le Travail Humain* 62 (1999), S. 223–246
- [Bundestag 2009] BUNDESTAG: Einführung und Bedeutung unbemannter militärischer Fahrzeuge und Luftfahrzeuge / Deutscher Bundestag 16. Wahlperiode Drucksache 16/12481. 2009. – Forschungsbericht
- [Bundeswehr 2007] BUNDESWEHR: Standard Operating Procedures (Landing Zone Operations) / Bundeswehr - LBwglBrig 1 - VS-NfD. 2007. – Forschungsbericht
- [Bundeswehr 2008] BUNDESWEHR: Combat Operating Procedures Air Manoeuvre / Bundeswehr - KHS-Rgt 36 und TH-Rgt 10 - VS-NfD. 2008. – Forschungsbericht
- [Byrne und Parasuraman 1996] BYRNE, E.A. ; PARASURAMAN, R.: Psychophysiology and adaptive automation. In: *Biological Psychology* 42 (3) (1996), S. 249–268
- [Cain 2007] CAIN, B.: A Review of the Mental Workload Literature (ADA474193) / Defence Research and Development Canada Toronto. 2007. – Forschungsbericht
- [Calmann u. a. 2002] CALMANN, M.P. ; WRIGTH, M.C. ; KABER, D.B.: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 46th Annual Meeting. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 46th Annual meeting*, Human Factors and Ergonomics Society, 2002, S. 342–346
- [Campbell und Wurtz 1978] CAMPBELL, F.W. ; WURTZ, R.H.: *Vision Research*. Kap. Saccadic Omission: Why we do not see a grey-out during a saccadic eye movement, S. 1297–1303, Pergamon Press, 1978
- [Canham 2001] CANHAM, L.S.: *Handbook of Human Factors Testing and Evaluation*. Kap. Operability Testing of Command, Control & Communications in Computers and Intelligence (C4I) Systems, Mallory International, 2001
- [Casali und Wierwille 1984] CASALI, J.G. ; WIERWILLE, W.W.: On the measurement of pilot perceptual workload: a comparison of assessment techniques addressing sensitivity and intrusion issues. In: *Ergonomics* 27(10) (1984), S. 1033–1050
- [Chignell und Hancock 1985] CHIGNELL, M.H. ; HANCOCK, P.A.: Strategies for Real-Time Task Allocation in Human-Machine Systems. In: *Proceedings of the Annual Meeting of Los Angeles Chapter of the Human Factors Society*, 1985
- [Christoffersen und Woods 2002] CHRISTOFFERSEN, K. ; WOODS, D.D.: *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research: Automation - Volume 2*. Kap. How to Make Automated Systems Team Players, S. 1–13, Elsevier Science Ltd, 2002
- [Colle und Reid 2005] COLLE, H.A. ; REID, G.B.: Estimating a Mental Workload Redline in a Simulated Air-to-Ground Combat Mission. In: *International Journal of Aviation Psychology* 15(4) (2005), S. 303–319

- [Cummings u. a. 2008] CUMMINGS, M.L. ; BRUNI, S. ; MERCIER, S. ; MITCHELL, J.: Automation Architecture for Single Operator-Multiple UAV Command and Control. In: *The International C2 Journal* Volume 1 Number 2 (2008), S. 1–24
- [Cummings u. a. 2007] CUMMINGS, M.L. ; NEHME, C.E. ; CRANDALL, J. ; MITCHELL, P.: Predicting Operator Capacity for Supervisory Control of Multiple UAVs. In: *Studies in Computational Intelligence (SCI)* 70 (2007), S. 11–37
- [Cummings u. a. 2006] CUMMINGS, M.L. ; PLATTS, J.T. ; SULMISTRAS, A.: Human Performance Considerations in the Development of Interoperability Standards for UAV Interfaces. In: *Proceedings of Moving Autonomy Forward Conference*, 2006
- [deWaard 1996] DEWAARD, D.: *The measurement of Drivers Mental Workload*, University of Groningen, Netherlands, Dissertation, 1996
- [Dick 1980] DICK, A.O.: Instrument scanning and controlling using eye movement data to understand pilot behavior and strategies (NASA CR 3306) / NASA. 1980. – Forschungsbericht
- [Dickson 2005] DICKSON, B.T.: The Cognitive Cockpit - a test-bed for Augmented Cognition. In: *In Proceedings of the First International Conference on Augmented Cognition*, 2005
- [Diethe u. a. 2004] DIETHE, T. R. ; DICKSON, T. B. ; SCHMORROW, D. ; RALEY, C.: Toward an Augmented Cockpit. In: *Proceedings of the 2nd Annual Human Performance, Situation Awareness, and Automation Conference*, 2004
- [Dompke 2001] DOMPKE, U.: Human Behavior Representation - Definition. In: *RTO SAS Lecture Series on Simulation of and for Military Decision Making - RTO-EN017*, 2001
- [Donath u. a. 2010] DONATH, D. ; RAUSCHERT, A. ; SCHULTE, A.: Cognitive Assistant System Concept for Multi-UAV-Guidance using Human Operator Behaviour Models. In: *Proceedings of Second International Conference on Humans Operating Unmanned Systems - HUMOUS'10*, 2010
- [Donath und Schulte 2006] DONATH, D. ; SCHULTE, A.: Weiterentwicklungsmöglichkeiten kognitiver und kooperativer Operateurassistenten - Ein Konzeptansatz für modellbasierte Adaptive Automation. In: *48. Fachausschusssitzung Anthropotechnik: Cognitive Systems Engineering in der Fahrzeug und Prozessführung*, 2006
- [Donchin u. a. 1986] DONCHIN, E. ; KRAMER, A.F. ; WICKENS, C.: *Psychophysiology: Systems, processes and applications*. Kap. Applications of brain event-related potentials to problems in engineering psychology, Middletown, N.J.: Till & Till, 1986
- [Drury und Scott 2008] DRURY, J.L. ; SCOTT, S.D.: Awareness in Unmanned Aerial Vehicle Operations. In: *The International C2 Journal - Special Issue: Awareness* Vol2, No1 (2008), S. 1–28
- [Duchowsky 2007] DUCHOWSKY, A.: *Eye Tracking Methodology*. Kap. Eye Tracking Techniques, S. 51–59, Springer Verlag, 2007
- [Durbin und Hicks 2009] DURBIN, D.B. ; HICKS, J.S.: AH-64 Apache Longbow Aircrew Workload Assessment for Unmanned Aerial System (UAS) Employment / Army Research Laboratory - ARL-TR-4707. 2009. – Forschungsbericht
- [Endsley und Kiris 1995] ENDSLEY, M. ; KIRIS, E.: Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. In: *Human Factors* 37(2) (1995), S. 381–398
- [Endsley 1987] ENDSLEY, M.R.: The application of human factors to the development of expert systems for advanced cockpits. In: *Proceedings of the Human Factors Society 31st Annual Meeting, Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society*, 1987
- [Endsley 1995] ENDSLEY, M.R.: Measurement of situation awareness in dynamic systems. In: *Human Factors* 37 (1995), S. 65–84

- [Endsley 1998] ENDSLEY, M.R.: A Comparative Analysis of SAGAT and SART for Evaluations of Situation Awareness. In: *Proceedings of the 42nd Annual Meeting of Human Factors & Ergonomics Society*, 1998
- [Endsley 2000a] ENDSLEY, M.R.: *Direct Measurement of Situation Awareness: Validity and Use of SAGAT*. Kap. Chapter 7, S. 147–173, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Mahwah, New Jersey, London, 2000
- [Endsley 2000b] ENDSLEY, M.R.: *Theoretical Underpinnings of Situation Awareness: A Critical Review*. Kap. Chapter 1, S. 3–32, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Mahwah, New Jersey, London, 2000
- [Endsley und Kaber 1999] ENDSLEY, M.R. ; KABER, D.B.: Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. In: *Ergonomics* 42 (1999), S. 462–492
- [Ephrath u. a. 1980] EPHRATH, A.R. ; TOLE, J.R. ; STEPHENS, A.T. ; YOUNG, L.R.: Instrument scan - Is it an indicator of the pilot's workload? In: *Proceedings of the Human Factors Society 24th Annual Meeting, Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society*, 1980
- [Fink u. a. 2003] FINK, G. ; KRISHNAMOORTHY, S. ; KANADE, A.: Naval Crew Workload Monitoring and Visualization. In: *In Proceedings of the First Annual Configuration on Systems Integration*, 2003
- [Fink 2003] FINK, G.A.: *Mustererkennung mit Markov-Modellen, Theorie-Praxis-Anwendungsgebiete*. B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003
- [Flemisch 2000] FLEMISCH, F.O.: *Pointillistische Analyse der visuellen und nicht-visuellen Interaktionsressourcen am Beispiel Pilot-Assistenzsystem*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2000
- [Forney 1973] FORNEY, G.D.: The Viterbi Algorithm. In: *In Proceedings of the IEEE* Vol. 61, Nr. 3 (1973), S. 268–278
- [Freiwald 2007] FREIWALD, G.: UAVs (Drohnen) der Bundeswehr / Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung. 2007. – Forschungsbericht
- [Funk 1991] FUNK, K.: Cockpit Task Management: Preliminary Definitions, Normative Theory, Error Taxonomy, and Design Recommendations. In: *The International Journal of Aviation Psychology* 1(4) (1991), S. 271–285
- [Gerlach 1996] GERLACH, M.: *Schnittstellengestaltung für ein Cockpitassistenzsystem unter besonderer Berücksichtigung von Spracheingabe*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1996
- [Gier u. a. 2008] GIER, R. ; WICKENS, C.D. ; KABER, D. ; STRAYER, D. ; BOEHM-DAVIS, D. ; JOHN, J.G. ; JOHN, M.St.: The Red-Line of Workload: Theory, Research, and Design. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 52nd Annual Meeting*, 2008
- [Goldberg und Kotval 1999] GOLDBERG, J.H. ; KOTVAL, X.P.: Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 24 (1999), S. 631–645
- [Gopher und Donchin 1986] GOPHER, D. ; DONCHIN, E.: *Handbook of Perception and Human Performance, Volumen II, Cognitive Processes and Performance*. Kap. Workload - An Examination of the Concept, John Wiley and Sons, 1986
- [Grandt 2004] GRANDT, M.: *Zur Erfassung und Bewertung der mentalen Beanspruchung mittels psychophysiologischer Messverfahren*, Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2004
- [de Greef und Arciszewski 2009] GREEF, T. de ; ARCISZEWSKI, H.: *Frontiers in Adaptive Control*. Kap. Triggering Adaptive Automation in Naval Command and Control, S. 165–188, InTech, 2009

- [Haarmann 2007] HAARMANN, A.: *Der Einsatz psychophysiologischer Variablen bei der adaptiven Automatisierung am Beispiel einer Flugsimulationsaufgabe*, Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2007
- [Hancock u. a. 1995] HANCOCK, P.A. ; WILLIAMS, G. ; MANNING, C.M. ; MIYAKE, S.: Influence of Task Demand Characteristics on Workload and Performance. In: *The International Journal of Aviation Psychology* 5(1) (1995), S. 63–86
- [Harris u. a. 1986] HARRIS, R.L. ; GLOVER, B.L. ; SPADY, A.A.: Analytic techniques of pilot scanning behaviour and their application (NASA Technical Report 2525) / NASA. 1986. – Forschungsbericht
- [Harris u. a. 1982] HARRIS, R.L. S. ; TOLE, J.R. ; STEPHENS, A.T. ; EPHRATH, A.R.: Visual Scanning Behavior and Pilot Workload. In: *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 53(11) (1982), S. 1067–1072
- [Hart und Wickens 1990] HART, S. G. ; WICKENS, C.D.: *Manprint: an integrated approach to systems integration*. Kap. Workload assessment and prediction, S. 257–296, New York: Van Nostrand, 1990
- [Hart und Staveland 1988] HART, S.G. ; STAVELAND, L.E.: *Human Mental Workload*. Kap. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, S. 139–184, Amsterdam: North Holland Press, 1988
- [Hayashi 2003] HAYASHI, M.: Hidden Markov Models to Identify Pilot Instrument Scanning and Attention Patterns. In: *In proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2003
- [Hayashi 2004] HAYASHI, M.: *Hidden Markov Models for Analysis of Instrument Scanning and Attention Switching*, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 2004
- [Hayashi u. a. 2005] HAYASHI, M. ; BEUTTER, B.R. ; MCCANN, R.S.: Hidden Markov Model Analysis for Space Shuttle Crewmembers' Scanning Behavior. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2005
- [Hayashi u. a. 2003] HAYASHI, M. ; OMAN, C.M. ; ZUSSCHLAG, M.: Hidden Markov Models as a Tool to Measure Pilot Attention Switching during Simulated ILS Approaches. In: *In Proceedings of 12th International Symposium on Aviation Psychology*, 2003
- [HFM-056/TG-008 2004] HFM-056/TG-008: Operator Functional State Assessment / RTO Human Factors and Medicine Panel (HFM) - HFM-056/TG-008. 2004. – Forschungsbericht
- [Hilburn und Jorna 2001] HILBURN, B. ; JORNA, P.G.: *Stress, Workload, and Fatigue*. Kap. Workload and Air Traffic Control, S. 384–394, Mahwah, N.J. Erlbaum Associates, 2001
- [Hilburn u. a. 1997] HILBURN, B. ; JORNA, P.G. ; BYRNE, E.A. ; PARASURAMAN, R.: *Human Automation Interaction: Research and Practice*. Kap. The effect of adaptive air traffic control (ATC) decision aiding on controller mental workload, S. 84–91, Mahwah, N.J. Erlbaum Associates, 1997
- [Hoc 2001] HOC, J.-M.: Toward a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. In: *International Journal of Human-Computer Studies* Volume 54, Issue 4 (2001), S. 509–540
- [Hoc und Lemoine 1998] HOC, J.M. ; LEMOINE, M.P.: Cognitive Evaluation of Human-Human and Human-Machine Cooperation Modes in Air Traffic Control. In: *The International Journal of Aviation Psychology* 8(1) (1998), S. 1–32
- [Hockey 1997] HOCKEY, G.R.: Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. In: *Biological Psychology* 45(1-3) (1997), S. 73–93

- [Hristov 2009] HRISTOV, B.: *Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2009
- [Inagaki 2000] INAGAKI, T.: Situation-adaptive autonomy for time-critical takeoff decisions. In: *International Journal of Modelling and Simulation* 20(2) (2000), S. 175–180
- [Inagaki 2003] INAGAKI, T.: *Handbook of Cognitive Task Design*. Kap. Adaptive Automation: Sharing and Trading of Control, Human Factors and Ergonomics Series, Lawrence Erlbaum Associates, 2003
- [Inagaki u. a. 1999] INAGAKI, T. ; TAKAE, Y. ; MORAY, N.: Automation and human interface for takeoff safety. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Aviation Psychology* (1999), S. 402–407
- [Johannsen 1993] JOHANNSEN, G.: *Mensch-Maschine-Systeme*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1993
- [Joos u. a. 2002] JOOS, M. ; RÖTTING, M. ; VELICHKOVSKY, B. M.: *Handbuch der Psycholinguistik*. Kap. Die Bewegung des menschlichen Auges: Fakten, Methoden, innovative Anwendungen, S. 142–168, De Greyter Berlin/NY, 2002
- [Kaber und Endsley 2003] KABER, D.B. ; ENDSLEY, M.R.: The effects of level of automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. In: *Theoretic Issues in Ergonomic Science* (2003), S. 1–40
- [Kaber und Riley 1999] KABER, D.B. ; RILEY, J.M.: Adaptive Automation of a Dynamic Control Task Based on Secondary Task Workload Measurement. In: *International Journal of Cognitive Ergonomics* 3(3) (1999), S. 169–187
- [Kaber u. a. 2001] KABER, D.B. ; RILEY, J.M. ; TAN, K.-W. ; ENDSLEY, M.R.: On the Design of Adaptive Automation for Complex Systems. In: *International Journal of Cognitive Ergonomics* 5(1) (2001), S. 37–57
- [Kantowitz 2000] KANTOWITZ, B. H.: Attention and mental workload. In: *In Proceedings of the 15th Triennial Congress IEA 2000/HFES*, 2000
- [Katz u. a. 1998] KATZ, L. C. ; FRASER, E. B. ; WAGNER, T. L.: Rotary-Wing Crew Communication Patterns Across Workload Levels. In: *Proceedings of RTO HFM Symposium on Current Aeromedical Issues in Rotary Wing Operations RTO MP-19*, 1998
- [Kerkau 2005] KERKAU, F.: *Biosignale der Pupille zur Steuerung intelligenter User Interfaces*, Freie Universität Berlin, Dissertation, 2005
- [Klein u. a. 2004] KLEIN, G. ; WOODS, D.D. ; BRADSHAW, J.M. ; HOFFMAN, R.R. ; FELTOVICH, P.J.: Ten Challenges for Making Automation a Team Player in Joint Human-Agent Activity. In: *IEEE Intelligent Systems* Vol.19, No. 6 (2004), S. 91–95
- [Knab 2000] KNAB, B.: *Erweiterungen von Hidden-Markov-Modellen zur Analyse ökonomischer Zeitreihen*, Universität Köln, Dissertation, 2000
- [Kootstra u. a. 2006] KOOTSTRA, G. ; NEDERVEEN, A. ; BOER, B.: On the Bottom-Up and Top-Down Influences of Eye Movements / University of Groningen - Artificial Intelligence. 2006. – Forschungsbericht
- [Kramer und Humphrey 1996] KRAMER, A.F. ; HUMPHREY, D.G.: *Automation and Performance - Theory and Applications*. Kap. Psychophysiological Measures of Workload: Potential Applications to Adaptively Automated Systems, Human Factors in Transportation, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, New Jersey, 1996
- [Lenz und Onken 2000] LENZ, A. ; ONKEN, R.: Pilot's assistant in tactical transport missions - Crew Assistant Military Aircraft CAMA. In: *Proceedings fo the RTO HFM Symposium on Usability of Information in Battle Management Operations - RTO MP-57*, 2000

- [Link u. a. 2008] LINK, D. ; TIETZE, H. ; SCHMIDT, L. ; SIEVERT, A. ; GORGES, W. ; LEYK, D.: *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme*. Kap. Berührungslose Augen- und Blickbewegungsmessung, S. 371–393, Springer Verlag, 2008
- [Liu u. a. 2004] LIU, N. ; DAVIS, R. I. A. ; LOVEL, B.C. ; KOOTSOOKOS, P. J.: Effect of Initial HMM Choices in Multiple Sequence Training for Gesture Recognition. In: *In Proceedings of the International Conference on Information Technology*, 2004
- [Loiselet und Hoc 1999] LOISELET, A. ; HOC, J.M: Assessment of a method to study cognitive cooperation in fighter aircraft piloting. In: *Proceedings of the 7th European Conference on Cognitive Science Approaches in Process Control*, 1999
- [Lysaght u. a. 1989a] LYSAGHT, R.J. ; HILL, S.G. ; DICK, A.O. ; PLAMADON, B.D. ; LINTON, P.M. ; WIERWILLE, W. W. ; ZAKLAD, A.L. J. ; WHERRY, R.J.: Operator Workload: Comprehensive Review and Evaluation of Operator Workload Methodologies (AD-A212879) / United States Army Research Institute for Behavioral and Social Science. 1989. – Forschungsbericht
- [Lysaght u. a. 1989b] LYSAGHT, R.J. ; HILL, S.G. ; DICK, A.O. ; PLAMADON, B.D. ; LINTON, P.M. ; WIERWILLE, W.W. ; ZAKLAD, A.L. ; BITTNER, A.C. J. ; WHERRY, R.J.: Operator Workload: Comprehensive Review and Evaluation of Operator Workload Methodologies (Technical Report 851 - AD-A212879) / United States Army Research Institute for Behavioral and Social Science. 1989. – Forschungsbericht
- [Mackworth 1950] MACKWORTH, N.H.: Researches on the measurement of human performance / Medical Research Council London. 1950. – Forschungsbericht
- [Maiwald und Benzler 2010] MAIWALD, F. ; BENZLER, A.: Berücksichtigung mentaler Operateurst Zustände bei der Weiterentwicklung wissensbasierter Assistenzsysteme. In: *Proceedings of 52. Fachausschusssitzung DGLR T5.4 Anthropotechnik - Innovative Interaktionstechnologien für Mensch-Maschine-Schnittstellen*, 2010
- [Maiwald und Schulte 2011] MAIWALD, F. ; SCHULTE, A.: Mental resource demands prediction as a key element for future assistant systems in military helicopters. In: *In: 9th Conference on Engineering Psychology & Cognitive Ergonomics, in conjunction with HCI International. Orlando, Florida.*, 2011
- [Malin und Schreckenghost 1992] MALIN, J.T. ; SCHRECKENGHOST, D.L.: Making Intelligent Systems Team Players - Overview for Designers (NASA Technical Memorandum 104751) / NASA. 1992. – Forschungsbericht
- [Manning und Schütze 1999] MANNING, C.D. ; SCHÜTZE, H.: *Foundations of Statistical Natural Language Processing*. The MIT Press, 1999
- [Manning u. a. 2004] MANNING, S.D. ; RASH, C.E. ; LEDUC, P.A. ; NOBACK, R.K. ; MCKEON, J.: The Role of Human Causal Factors in U.S Army Unmanned Aerial Vehicle Accidents / U.S. Army Aeromedical Research Laboratory (USAARL) - Aircrew Health and Performance Division - Report No. 2004-11. 2004. – Forschungsbericht
- [Meitinger 2008] MEITINGER, C.: *Kognitive Automation zur kooperativen UAV-Flugführung*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2008
- [Meitinger und Schulte 2006a] MEITINGER, C. ; SCHULTE, A.: Cognitive machine co-operation as basis for guidance of multiple UAVs. In: *NATO RTO HFM Symposium on Human Factors of Uninhabited Military Vehicles as Force Multipliers. Biarritz, France. 9th-11th October 2006*, 2006
- [Meitinger und Schulte 2006b] MEITINGER, C. ; SCHULTE, A.: Human-Centred Automation for UAV Guidance: Oxymoron or Tautology? The Potential of Cognitive and Co-operative Systems. In: *1st Moving Autonomy Forward Conference, Grantham, UK 21 - 22 June 2006*, 2006

- [Merchant u. a. 1974] MERCHANT, J. ; MORRISSETTE, R. ; PORTERFIELD, J.L.: Remote Measurement of Eye Direction Allowing Subject Motion Over One Cubic Foot of Space. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol BME-21-No.4*, 1974
- [Meshkati 1998] MESHKATI, N.: *Human Mental Workload*. Kap. Heart rate variability and mental workload assessment, S. 101–115, Elsevier Science Ltd, 1998
- [Metthews 2001] METTHEWS, G.: *Stress, workload and fatigue*. Kap. Levels of transaction: A cognitive science framework for operator stress, S. 5–33, Mahwah, N.J. Erlbaum Associates, 2001
- [Miller 2004] MILLER, C.A.: Human Computer Etiquette: Managing Expectations with Intentional Agents. In: *Communications of the ACM* Volume 47, Issue 4 (2004)
- [Miller und Hannen 1998] MILLER, C.A. ; HANNEN, M.D.: User Acceptance of an Intelligent User Interface: A Rotorcraft Pilot's Associate Example. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent User Interfaces, Los Angeles, CA*, 1998
- [Miller und Hannen 1999a] MILLER, C.A. ; HANNEN, M.D.: The Rotorcraft Pilot's Associate Cockpit Information Manager: Acceptable Behavior from a New Crew Member. In: *Proceedings of the American Helicopter Society 55th Annual Forum, Montreal, Quebec*, 1999
- [Miller und Hannen 1999b] MILLER, C.A. ; HANNEN, M.D.: The Rotorcraft Pilot's Associate: design and evaluation of an intelligent user interface for cockpit information management. In: *Knowledge-Based Systems* 12 (1999), S. 443–456
- [Miller u. a. 1999] MILLER, C.A. ; HANNEN, M.D. ; GUERLAIN, S.: The Rotorcraft Pilot's Associate Cockpit Information Manager: Acceptable Behavior from a New Crewmember. In: *Proceedings of the American Helicopter Society's FORUM 55*, 1999
- [Nocera u. a. 2007] NOCERA, F. D. ; CAMILI, M. ; M.TERENZI: A Random Glance at the Flight Deck: Pilot's Scanning Strategies and the Real-Time Assessment of Mental Workload. In: *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* Volume 1, Number 3, Fall 2007 (2007), S. 271–285
- [O'Donnel und Eggemeier 1986] O'DONNEL, R.D. ; EGGEMEIER, F.T.: *Handbook of perception and human performance*. Kap. Workload Assessment Methodology, New York: Wiley, 1986
- [Onken 1994] ONKEN, R.: Basic Requirements Concerning Man-Machine Interactions in Combat Aircraft. In: *Workshop on Human Factors/Future Combat Aircraft - 4.-6. October, Ottobrunn*, 1994
- [Onken 2002] ONKEN, R.: Cognitive Cooperation for the Sake of Human-Machine Team Effectiveness. In: *RTO-Meeting Proceedings MP-088, HFM-084: The Role of Humans in Intelligent and Automated Systems*, 2002
- [Onken und Schulte 2010] ONKEN, R. ; SCHULTE, A.: *System-ergonomic Design of Cognitive Automation -Dual Mode Cognitive Design of Vehicle Guidance and Control Work Systems*. Springer, Heidelberg, 2010
- [Oppermann 1994] OPPERMAN, R.: *Adaptive User Support: Ergonomic Design of Manually and Automatically Adaptable Software*. Hillsdale, N.J., Lawrence Erlbaum, 1994
- [Parasuraman 1986] PARASURAMAN, R.: *Handbook of perception and human performance, Volume 2, Cognitive Processes and Performance*. Kap. Vigilance, monitoring and search, New York: John Wiley and Sons, 1986
- [Parasuraman u. a. 1992] PARASURAMAN, R. ; BAHRI, T. ; DEATON, J.E. ; MORRISON, J.G. ; BARNES, M.: Theory and Design of Adaptive Automation in Aviation Systems (NAWCADWAR-92033-60) / Naval Air Warfare Center. 1992. – Forschungsbericht

- [Parasuraman und Hancock 2000] PARASURAMAN, R. ; HANCOCK, P.A.: *Stress, Workload and Fatigue*. Kap. Adaptive Control and Mental Workload, S. 305–321, Human Factors in Transportation, 2000
- [Parasuraman u. a. 1991] PARASURAMAN, R. ; HILBURN, B. ; MOLLOY, R. ; SINGH, I.: Adaptive Automation and Human Performance III: Effects of practice on the benefits and cost of automation shifts (NAWCADWAR-32037-60) / Naval Air Warfare Center, Warminster, PA. 1991. – Forschungsbericht
- [Parasuraman und Rovira 2005] PARASURAMAN, R. ; ROVIRA, E.: Workload Modeling and Workload Management: Recent Theoretical Developments / Army Research Laboratory - ARL-CR-0562. 2005. – Forschungsbericht
- [Parasuraman u. a. 2000] PARASURAMAN, R. ; SHERIDAN, T.B. ; WICKENS, C.D.: A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* Vol. 30, No. 3 (2000)
- [Parasuraman u. a. 2008] PARASURAMAN, R. ; SHERIDAN, T.B. ; WICKENS, C.D.: Situation Awareness, Mental Workload, and Trust in Automation: Viable, Empirically Supported Cognitive Engineering Constructs. In: *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* Volume2, Number2 (2008), S. 140–160
- [Pfister und Kaufmann 2008] PFISTER, Beat ; KAUFMANN, Tobias: *Sprachverarbeitung - Grundlagen und Methoden der Sprachsynthese und Spracherkennung*. Springer Verlag, 2008
- [Prevot 1995] PREVOT, T.: *Maschinelles Flugplaner für Verkehrsflugzeuge als autonomes und kooperatives System*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1995
- [Prinzel 2003] PRINZEL, L.J.: Team-Centered Perspective for Adaptive Automation Design (NASA TM 2003 212154) / NASA. 2003. – Forschungsbericht
- [Prinzel u. a. 2001] PRINZEL, L.J. ; POPE, A.T. ; FREEMAN, F.G. ; SCERBO, M.W. ; MILKULKA, P.J.: Empirical Analysis of EEG and ERPs for Psychophysiological Adaptive Task Allocation / NASA-TM-2001-211016. 2001. – Forschungsbericht
- [Priztel u. a. 2009] PRIZTEL, M. ; BRAND, M. ; MARKOWITSCH, J.J.: *Gehirn und Verhalten - Ein Grundkurs der physiologischen Psychologie*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin, 2009
- [Rabiner und Juang 1994] RABINER, L. ; JUANG, B.-H.: *Fundamentals of Speech Recognition*. Prentice Hall, New York, 1994
- [Rabiner 1989] RABINER, Lawrence R.: A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition. In: *Proceedings of the IEEE Vol.77 No.2*, 1989
- [Rasmussen 1983] RASMUSSEN, J.: Skills, rules and knowledge, signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* Volume SMC-13 (1983), S. 257–266
- [Rauschert u. a. 2008] RAUSCHERT, A. ; MEITINGER, C. ; SCHULTE, A.: Experimentally discovered operator assistance needs in the guidance of cognitive and cooperative UAVs. In: *Proceedings of Humans operating unmanned systems - HUMOUS'08*, 2008
- [Rauschert und Schulte 2011] RAUSCHERT, A. ; SCHULTE, A.: Cognitive and cooperative assistant system for aerial manned-unmanned teaming mission / NATO Research and Technology Agency, Human Factors and Medicine Panel, Task Group HFM-170 on Supervisory Control of Multiple Uninhabited Systems: Methodology and Enabling Operator Interface Technologies. RTO-TR-HFM-170. 2011. – Forschungsbericht
- [REFA 1984] REFA: *REFA: Methoden des Arbeitsstudiums - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation*. Carl Hanser Verlag, 1984

- [Rehmann 1995] REHMANN, A.: Handboook of Human Performance Measures and Crew Requirements for Flightdeck Research DOT/FAA/CT-TN95/49. 1995. – Forschungsbericht
- [Rohmert 1984] ROHMERT, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 38(10) (1984), S. 193–200
- [Rohmert und Rutenfranz 1975] ROHMERT, W. ; RUTENFRANZ, J.: Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen industriellen Arbeitsplätzen / Bonn- Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung - Referat Öffentlichkeitsarbeit. 1975. – Forschungsbericht
- [Rouse 1976] ROUSE, W.B.: *Monitoring behavior and supervisory control*. Kap. Adaptive allocation of decision making responsibility between supervisor and computer, S. 295–306, New York: Plenum Press, 1976
- [Rouse 1988] ROUSE, W.B.: Adaptive aiding for human/computer control. In: *Human Factors* 30(4) (1988), S. 431–443
- [Rouse und Rouse 1983] ROUSE, W.B. ; ROUSE, S.H.: A framwork for research on adaptive decision aids (AFAMRL-TR-83-082) / Wright-Patterson Air Force Base OH: Aerospace Medical Research Laboratory. 1983. – Forschungsbericht
- [Rötting 2001] RÖTTING, M.: *Parametersystematik der Augen- und Blickbewegungen für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen*, RWTH Aachen, Dissertation, 2001
- [Ruckdeschel 1997] RUCKDESCHER, W.: *Modellierung regelbasierten Pilotenverhaltens mit Petrinetzen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1997
- [Salas u. a. 1992] SALAS, E. ; DICKINSON, T.L. ; CONVERSE, S.A.: *Teams: Their Training and Performance*. Kap. Toward an Understanding of Team Performance and Training, Norwood, New Jersey: Ablex Publishing Corporation, 1992
- [Salvucci 1999] SALVUCCI, D.D.: *Mapping Eye Movements to Cognitive Processes*, Carnegie Mellon University - Department of Computer Science, Dissertation, 1999
- [Salvucci und Goldberg 2000] SALVUCCI, D.D. ; GOLDBERG, J.H.: *Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium*. Kap. Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols, S. 71–78, New York: ACM Press, 2000
- [Sarter u. a. 1997] SARTER, N.B. ; WOODS, D.D. ; BILLINGS, C.E.: *Handbook of Human Factors & Ergonomics*. Kap. Automation Surprises, Wiley, 1997
- [Scallen und Hancock 2001] SCALLEN, S.F. ; HANCOCK, P.A.: Implementing Adaptive Function Allocation. In: *International Journal of Aviation Psychology* 11(2) (2001), S. 197–221
- [Scerbo u. a. 2000] SCERBO, M. W. ; FREEMAN, F.G. ; MIKULKA, P.J.: *Engineering Psychology - Issues and Applications*. Kap. A Biocybernetic System for Adaptive Automation, S. 241–255, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Mahwah, New Jersey, London, 2000
- [Scerbo 1996] SCERBO, M.S.: *Automation and human performance: Theory and applications*. Kap. Theoretical perspectives on adaptive automation, S. 37–63, Mahwah, N.J. Erlbaum Associates, 1996
- [Scerbo 1994] SCERBO, M.W.: *Human Performance in Automated Systems: Current Research and Trends*. Kap. Implementing adaptive automation in aviation: The pilot-cockpit team, S. 249–255, Hillsdale, N.J., Lawrence Erlbaum Associates, 1994
- [Scerbo 2002] SCERBO, M.W.: Computer Teammates: Should They Read Your Mind? / AAAI Technical Report FS-02-02. 2002. – Forschungsbericht
- [Scerbo 2006] SCERBO, M.W.: *Neuroergonomics: The brain at work*. Kap. Adaptive Automation, S. 239–252, Oxford University Press, 2006

- [Scerbo 2008] SCERBO, M.W.: Adaptive Automation. In: *Neuroergonomics* 1 (2008), S. 239–253
- [Scerbo u. a. 2001] SCERBO, M.W. ; FREEMAN, F.G. ; MIKULKA, P.J. ; DiNOCERA, F. ; III, L.J. P.: The Efficacy of Psychophysiological Measures for Implementing Adaptive Technology (NASA/TP-2001-211018) / NASA. 2001. – Forschungsbericht
- [Schenk und Rigoll 2010] SCHENK, J. ; RIGOLL, G.: *Mensch-Maschine-Kommunikation - Grundlagen von sprach- und bildbasierten Benutzerschnittstellen*. Springer Verlag, 2010
- [Schlick u. a. 2010] SCHLICK, C. ; BRUDER, R. ; LUCZAK, H.: *Arbeitswissenschaft*. Springer Verlag, 2010
- [Schliep 2002] SCHLIEP, Alexander: *A Bayesian Approach to Learning Hidden Markov Model Topology with Applications to Biological Sequence Analysis*, Universität Köln, Dissertation, 2002
- [Schmalhofer u. a. 1991] SCHMALHOFER, F. (Hrsg.) ; STRUBE, G. (Hrsg.) ; WETTER, Th. (Hrsg.): *Contemporary Knowledge Engineering and Cognition*. Springer Verlag, 1991
- [Schmidt 2008] SCHMIDT, L: *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme*. Kap. Ergonomie und Führungssysteme, S. 67–78, Springer Verlag, 2008
- [Schmorrow und Reeves 2007] SCHMORROW, D.D. ; REEVES, L.M.: 21st Century Human-System Computing: Augmented Cognition for Improved Human Performance. In: *Aviation, Space, and Environmental Medicine* Vol. 78, No. 5 (2007), S. 7–11
- [Schulte 1996] SCHULTE, A.: *Visuelle Routinen von Piloten*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1996
- [Schulte 2001] SCHULTE, A.: Mission Management and Crew Assistance for Military Aircraft - Cognitive Concepts and Prototype Evaluation -. In: *Proceedings of the RTO SCI Lecture Series on Tactical Decision Aids and Situational Awareness - RTO-EN-019*, 2001
- [Schulte und Donath 2011] SCHULTE, A. ; DONATH, D.: Measuring self-adaptive UAV operator's load-shedding strategies under high workload. In: *9th Conference on Engineering Psychology & Cognitive Ergonomics in conjunction with HCI International*, 2011
- [Schulte und Stütz 1998] SCHULTE, A. ; STÜTZ, P.: Evaluation of the Cockpit Assistant Military Aircraft CAMA in Simulator Trials. In: *Proceedings of the RTO SCI Symposium on Sensor Data Fusion and Integration of the Human Element - RTO MP 12*, 1998
- [Schulte 2006] SCHULTE, Axel: Manned-Unmanned Missions: Chance or Challenge? In: *The Journal of the JAPCC (Joint Air Power Competence Centre)* Edition 3 (2006)
- [seeingmachines 2009] SEEINGMACHINES: *faceLAB5 - User Manual*. 2009
- [Seifert u. a. 2001] SEIFERT, K. ; RÖTTING, M. ; JUNG, R.: *Kraftfahrzeugführung*. Kap. Registrierung von Blickbewegungen im Kraftfahrzeug, S. 207–228, Springer Verlag, 2001
- [Sheridan 1992] SHERIDAN, T.B.: *Telerobotics, automation and human supervisory control*. MA: The MIT press, 1992
- [Sheridan und Verplank 1978] SHERIDAN, T.B. ; VERPLANK, W.: Human and Computer Control of Undersea Teleoperators / Cambridge, MA, Man-Machine Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering MIT. 1978. – Forschungsbericht
- [Sherry und Ritter 2002] SHERRY, R.R. ; RITTER, F.E.: Dynamic Task Allocation: Issues for Implementing Adaptive Intelligent Automation / School of Information Science and Technology - The Pennsylvania State University. 2002. – Forschungsbericht
- [Shingledecker und Crabtree 1982] SHINGLEDECKER, C.A. ; CRABTREE, M.S.: Subsidiary radio communication tasks for workload assessment in R&D simulations II: Task Sensitivity Evaluation (AFAMRL-TR-82-57) / Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Aerospace Medical Research Laboratory. 1982. – Forschungsbericht

- [Silberstein und Dietrich 2003] SILBERSTEIN, D. ; DIETRICH, R.: *Communication in High Risk Environments*. Kap. Cockpit Communication under High Cognitive Workload, S. 9–56, Buske, Hamburg, 2003
- [Simola u. a. 2008] SIMOLA, J. ; SAOJÄRVI, J. ; KOJO, I.: *Cognitive systems research*. Kap. Using Hidden Markov model to uncover processing states from eye movements in information search tasks, S. 237–251, Science Direct, 2008
- [Solso 2005] SOLSO, R. L.: *Kognitive Psychologie*. Springer Verlag, 2005
- [Sperandio 1971] SPERANDIO, A.: Variation of operator's strategies and regulating effects on workload. In: *Ergonomics* 14 (1971), S. 571–577
- [Sperandio 1978] SPERANDIO, A.: The regulation of working methods as a function of workload among air traffic controllers. In: *Ergonomics* 21 (1978), S. 367–390
- [Strenzke u. a. 2011] STRENZKE, R. ; UHRMANN, J. ; BENZLER, A. ; MAIWALD, F. ; RAUSCHERT, A. ; SCHULTE, A.: Managing Cockpit Crew Excess Task Load in Military Manned-Unmanned Teaming Missions by Dual-Mode Cognitive Automation Approaches. In: *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control*, 2011
- [Strohal 1999] STROHAL, M.: *Pilotenfehler- und -absichtserkennung als Baustein für ein Cockpitassistentensystem mittels eines halbautomatischen Verfahrens zur Situationsklassifikation*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1999
- [Stütz 1999] STÜTZ, Peter: *Adaptive Modellierung des regelbasierten Pilotenverhaltens im Cockpitassistentensystem*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1999
- [Tanguay 1993] TANGUAY, D.O.: *Hidden Markov Models for Gesture Recognition*, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 1993
- [Taylor 2001] TAYLOR, R.M.: Technologies for Supporting Human Cognitive Control / RTO-MP-077. 2001. – Forschungsbericht
- [Taylor u. a. 2002] TAYLOR, R.M. ; BONNER, M.C. ; DICKSON, B. ; HOWELLS, H. ; MILLER, C. ; MILTON, N. ; PLEYDELL-PEARCE, K. ; SHADBOLT, N. ; TENNISON, J. ; WHITECROSS, S.: *Cognitive systems engineering in military aviation environments: Avoiding cogminutia fragmentosa!* Kap. Cognitive cockpit engineering: coupling functional state assessment, task knowledge management, and decision support for context-sensitive aiding, S. 253–312, Wright-Patterson Air Force Base, OH: Human Systems Information Analysis Center, 2002
- [Tole u. a. 1983] TOLE, J.R. ; STEPHENS, A.T. ; VIVAUDOU, M. ; EPHRATH, A.R. ; YOUNG, L.R.: Visual scanning behavior and pilot workload - Contractor Report 3717 / NASA-Langley Research Center. 1983. – Forschungsbericht
- [Tsang und Wilson 1997] TSANG, P.S ; WILSON, G.F.: *Handbook of human factors and ergonomics*. Kap. Mental Workload, S. 417–449, New York: John Wiley and Sons, 1997
- [Uhrmann und Schulte 2011] UHRMANN, H. ; SCHULTE, A.: Task-based Guidance of Multiple UAV Using Cognitive Automation. In: *Proceddings of Cognitive 2011*, 2011
- [Uhrmann u. a. 2009] UHRMANN, J. ; STRENZKE, R. ; RAUSCHERT, A. ; MEITINGER, C. ; SCHULTE, A.: Manned-Unmanned Teaming: Artificial cognition applied to multiple UAV guidance. In: *Proceedings of the NATO RTO SCI 202 Symposium on Intelligent Uninhabited Vehicle Guidance Systems*, 2009
- [Uhrmann u. a. 2010a] UHRMANN, J. ; STRENZKE, R. ; SCHULTE, A.: Human Supervisory Control of Multiple UAVs by use of Task Based Guidance. In: *Proceedings of Humans operating unmanned systems - HUMOUS'10*, 2010

- [Uhrmann u. a. 2010b] UHRMANN, J. ; STRENZKE, R. ; SCHULTE, A.: Task-based guidance of multiple detached unmanned sensor platforms in military helicopter operations. In: *Proceedings of Cognitive Systems with Interactive Sensors*, 2010
- [Vanderhagen u. a. 1994] VANDERHAGEN, F. ; CREVITS, I. ; DEBERNARD, S. ; MILLOT, P.: Human-Machine Cooperation: Toward an Activity Regulation Assistance for Different Air Traffic Control Levels. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 6(1) (1994), S. 65–104
- [Veltman und Jansen 2003] VELTMAN, H.J.A. ; JANSEN, C.: *Operator Functional State - The Assessment and Prediction of Human Performance Degradation in Complex Tasks*. Kap. Differentiation of Mental Effort Measures: Consequences for Adaptive Automation, S. 249–259, IOS Press - NATO Science Series, 2003
- [Veltman und Jansen 2006] VELTMAN, J.A. ; JANSEN, C.: The role of operator state assessment in adaptive automation / TNO-DV3 2005 A245. 2006. – Forschungsbericht
- [Vohla 2010] VOHLA, M.: *Echzeit-Generierung von Flugpfaden für die Darstellung von Computer Generated Forces und unbemannten Rotorflüglern - Studienarbeit - LRT-13/S/10-3*, Universität der Bundeswehr München - LRT13, Diplomarbeit, 2010
- [Walsdorf und Onken 1998] WALSDORF, A. ; ONKEN, R.: Intelligent Crew Assistant for Military Transport Aircraft. In: *Proceedings of RTO SCI Symposium on Sensor Data Fusion and Integration of the Human Element - RTO- MP-12*, 1998
- [Weitzenberg u. a. 2000] WEITZENBERG, J. ; POSCH, S. ; ROST, M.: Diskrete Hidden Markov Modelle zur Analyse von Meßkurven amperometrischer Biosensoren. In: *Mustererkennung 2000 - Proceedings 22.DAGM-Symposium*, 2000
- [Wendemuth 2004] WENDEMUTH, A.: *Grundlagen der stochastischen Sprachverarbeitung*. Oldenbourg Verlag München Wien, 2004
- [Wichern 2001] WICHERN, B.: *Hidden-Markov-Modelle zur Analyse und Simulation von Finanzzeitreihen*, Universität Köln, Dissertation, 2001
- [Wickens 1992] WICKENS, C.D.: *Engineering Psychology and Human Performance*. New York: Harper Collings Publishers Inc., 1992
- [Wickens und Hollands 2000] WICKENS, C.D. ; HOLLANDS, J.G.: *Engineering Psychology and Human Performance*. Prentice Hall, New York, 2000
- [Wickens u. a. 1997] WICKENS, C.D. ; MAVOR, A.S. ; MCGEE, J.P.: *Flight to the future - Human factors in air traffic control*. National Academy Press, Washington D.C., 1997
- [Widdel 1984] WIDDEL, H.: *Theoretical and Applied Aspects of Eye Movement Research*. Kap. Operational problems in analysing eye movements, S. 21–29, New York: Esvier, 1984
- [Wiener 1989] WIENER, E.L.: Human factors of advanced technology ('glass cockpit') transport aircraft / NASA Ames Research Center. 1989. – Forschungsbericht
- [Wilson 1991] WILSON, G.F.: Progress in the Psychophysiological Assesment of Workload (AL-TR-1992-0007) / Armstrong Laboratory, Air Force System Command, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio. 1991. – Forschungsbericht
- [Wilson 2002] WILSON, J.R.: UAVs and The Human Factor - As the combat role of unmanned aerial vehicles grows in importance and complexity, so does the work of the human operator. In: *AIAA - Aerospace* (2002)
- [Wittig 1994] WITTIG, T.: *Maschinelle Erkennung von Pilotenabsichten und Pilotenfehler über heuristische Klassifikation*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1994
- [Wormser 1974] WORMSER, R.: *Experimentelle Psychologie*. Reinhard (UTB396), 1974

- [Wunsch 2001] WUNSCH, H.: Der Baum-Welch Algorithmus für Hidden Markov Models, ein Spezialfall des EM-Algorithmus / Universität Tübingen. URL <http://www.sfs.uni-tuebingen.de/resources/em.pdf>, 2001. – Forschungsbericht
- [Young und Stanton 2001] YOUNG, M.S ; STANTON, N. A.: *International encyclopedia of ergonomics and human factors*. Kap. Mental workload: Theory, measurement and application, S. 507–509, London: Taylor & Francis, 2001
- [Young und Stanton 1987] YOUNG, M.S. ; STANTON, N.A.: Attention and Automation: New perspectives on mental underload and performance. In: *Proceedings of the 11th ACM Symposium on Operating Systems - Communication in the Implementation of a Multiprocessor Operating System*, 1987, S. 63–76
- [Zimbardo 1988] ZIMBARDO, P.G.: *Psychologie*. Springer Verlag, 1988
- [Zuber und Stark 1966] ZUBER, B.L. ; STARK, L.: Saccadic Suppression: Elevation of Visual Treshold Associated with Saccadic Eye Movements. In: *Experimental Neurology* 16 (1966), S. 65–79

Anhang A

Fragebogen

Fragebogen: Beurteilung des UAV-Operator/Kommandantenarbeitsplatzes

1. Touch-Displays

Der Arbeitsplatz bestand im Wesentlichen aus zwei Touchdisplays, über die die UAVs FMS-basiert geführt und im Rahmen der Aufklärungsaufgabe eingesetzt wurden.

Die Interaktion mit den UAVs über die Multi-Funktionstouch-Displays war für die UAV-Führung (Route abfliegen, Routen umplanen):

nich geeignet	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	sehr gut geeignet
---------------	-----------------------------	-------------------

Für die Routenaufklärung und die damit verbundene Objekt-Identifizierungsaufgabe waren die Multi-Funktionstouch-Displays:

nich geeignet	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	sehr gut geeignet
---------------	---------------------------------	-------------------

Für kurzfristig notwendige Umplanungsaufgaben infolge SAM-Bedrohung sind die Multi-Funktionstouch-Displays:

sehr gut geeignet	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	ungeeignet
-------------------	---------------------------------	------------

Verbesserungsvorschläge: _____

Um mit der Bedienung der Operateurkonsole zur Aufgabenbearbeitung vertraut zu werden, erhielten Sie eine Einführung, sowie einen Tag Training in der Simulationsumgebung.

problemlos möglich	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	unmöglich
selbsterklärend	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	unverständlich
unzweckmäßig	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	zweckmäßig

zu lang	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	zu kurz
förderlich	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	hinderlich
angemessen	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	unangemessen

hilfreich	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	nicht hilfreich
zu kurz	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	zu lang
angemessen	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	unangemessen

Verbesserungsvorschläge: _____

Um Sie in den Aufgabenkontext und in ein möglichst realistisches Szenario zu versetzen, wurde den Missionsdurchführungen (1 UAV / 3 UAVs), sowie der Komplexmission jeweils ein Missionsbriefing vorangestellt.

geeignet	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	ungeeignet
zu lang	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	zu kurz

unvollständig	$[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]$	vollständig
zweckmäßig	$[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]$	unzweckmäßig

Verbesserungsvorschläge: _____

Wesentliches Ziel dieser Versuche war die kontinuierliche Erfassung der Operatorinteraktionen während der Aufgabenbearbeitung. Hierfür wurden während des Experiments Ihre Blickbewegungen aufgezeichnet.

Die videobasierte Erfassung der Blickbewegungen im Rahmen der Aufgabenbearbeitung empfanden Sie als:

einschränkend	$[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]$	nicht einschränkend
störend	$[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]$	nicht störend
nicht belastend	$[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]$	belastend

Infolge des nur limitierten Erfassungsbereiches der Blickbewegungskameras wurden während der Mission ab und an Korrekturinformationen überwiegend auditiv vermittelt.

Die auditiven Korrekturhinweise für die Blickbewegungen empfanden Sie als:

störend	$[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]$	nicht störend
ablenkend	$[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]\text{---}[[\text{---}]]$	nicht ablenkend

Verbesserungsvorschläge: _____

Welche der folgenden Einschränkungen wurde durch die verwendete Messapertur der Blickbewegungen hervorgerufen [1: keine Einschränkung - 5: massive Einschränkung]:

[] Einschränkung der Bewegungsfreiheit

[] Einschränkung der Kopfbewegungen

[] Tränende Augen

andere:

Welche Auswirkungen haben die notwendigen Unterbrechungen zur Erfassung der subjektiven Beanspruchung mit dem NASA-TLX-Bogen und der Situationserfassung hervorgerufen [1: keine Einschränkung - 5: massive Einschränkung]:

[] Rückfinden in die Aufgabensituation

[] Wiederherstellen des Situationsbewusstseins

[] Aufgabenbearbeitung

[] Auswirkung auf die Aufmerksamkeit

Die Tatsache, dass der Fokus der Experimente in der Verhaltensbeobachtung lag, hat ihr eigenes Verhalten beeinflusst/verändert:

trifft zu	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	trifft nicht zu
-----------	---------------------------------	-----------------

Wenn das Experiment nicht im Simulator stattgefunden hätte, sondern in einem realen Szenario. Hätte sich Ihr Verhalten geändert?

nein	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	ja
------	---------------------------------	----

Was an ihrem Verhalten hätte sich geändert:

Verbesserungsvorschläge: _____

7. Simulator

Wie schätzen Sie die Eignung des Simulators für die Multi-UAV-Führung vom Kommandantenarbeitsplatz ein:

geeignet	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	ungeeignet
zweckmäßig	[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]-[]	unzweckmäßig

Ist der Kommandantenarbeitsplatz im Cockpit für die Aufgabenbearbeitung:

vorteilhaft	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	unvorteilhaft
zweckmäßig	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	unzweckmäßig
ungeeignet	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	geeignet

Wie hilfreich schätzen Sie die Aussensichtanlage (180° Rückwandprojektion) ein, um sich in das aktuelle Missionsgeschehen hinein zu versetzen.

hilfreich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nicht hilfreich
zweckmäßig	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nicht zweckmäßig

Verbesserungsvorschläge: _____

8. Versuche

Die Versuche zur FMS-basierten Führung von 1/3 UAVs waren:

nicht herausfordernd	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	herausfordernd
interessant	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	langweilig
belastend	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nicht belastend

Empfanden Sie während der Experimente:

(1) Unterforderung mit plötzlich hoher Belastung

ja	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nein, überhaupt nicht
----	---	-----------------------

In welcher Situation/Situationen:

(2) Kurzfristige Überforderung:

ja	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nein, überhaupt nicht
----	---	-----------------------

In welcher Situation/Situationen:

(3) Längerandauernde Überforderung/Ermüdung:

ja	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nein, überhaupt nicht
----	---	-----------------------

In welcher Situation/Situationen:

(4) Verhielten sich die UAVs für Sie unvorhergesehen:

ja	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nein, überhaupt nicht
----	---	-----------------------

In welcher Situation/Situationen:

(5) Hatten Sie als Kommandant eher das Gefühl mit den UAVs zu fliegen, als im Hubschrauber:

ja	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nein, überhaupt nicht
----	---	-----------------------

In welcher Situation/Situationen:

(6) Waren Sie sich zu jederzeit über die Position des HC in Bezug auf die Mission/UAVs bewusst:

ja	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nein, überhaupt nicht
----	---	-----------------------

In welcher Situation/Situationen:

9. Allgemein

[1] Wenn Sie bei einem Crewmitglied Anzeichen von Unterforderung, oder Überforderung erkennen, woran erkennen Sie diese?

[2] Welche Maßnahmen ergreifen Sie in einer derartigen Situation gegen die Unter-/Überforderung?

[3] Wie und ab wann würden Sie bei Erkennen einer Über-/Unterforderungssituation aktiv in das Geschehen eingreifen?

[4] Woran merken Sie, dass Sie selbst in ein potentiell kritischen Zustand (Über-/Unterforderung) kommen?

[5] Was tun Sie dagegen (in der Situation/nach der Situation)?

[6] Was würden Sie von ihrem Crewmitglied in einer solchen Situation erwarten?

[7] Was würden Sie von einem technischen System (Assistenzsystem/elektronischer Copilot) in einer solchen Situation erhoffen?

[8] Welche Eingriffe würden Sie einem technischen System (Assistenzsystem) in derartigen Situationen zugestehen?

Anhang B

Scaling

Skalierte Berechnung des Vorwärts- und Rückwärtsalgorithmus

skalierter Vorwärtsalgorithmus:

Für die Berechnung des skalierten Vorwärtsalgorithmus werden folgende Variablen eingeführt:

$\alpha_t(i)$: unskaliert,

$\hat{\alpha}_t(i)$: lokale Version von α vor der Skalierung,

$\hat{\alpha}_t(i)$ skalierte Version der Vorwärtswahrscheinlichkeit α ,

Skalierungsfaktor c_t

Initialisierung:

$t = 1$

$$\alpha_1 = \pi_i b_i(O_1), \quad 1 \leq i \leq N \quad (\text{B.1})$$

$$\hat{\alpha}_t(i) = \alpha_1 = \pi_i b_i(O_1) \quad (\text{B.2})$$

$$c_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \alpha_1(i)} \quad (\text{B.3})$$

$$\hat{\alpha}_t = c_1 \hat{\alpha}_1(i) \quad (\text{B.4})$$

Induktion:

$2 \leq t \leq T$

$$\hat{\alpha}_t(i) = \left[\sum_{j=1}^N \hat{\alpha}_t(j) a_{ji} \right] b_i(O_t) \quad (\text{B.5})$$

$$c_t = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \hat{\alpha}_t(i)} \quad (\text{B.6})$$

$$\hat{\alpha}_t(i) = c_t \hat{\alpha}_t(i) \quad (\text{B.7})$$

In der skalierten Version erfolgt keine Berechnung der Variablen $\alpha_t(i)$ mehr, so dass folglich auch die Produktionswahrscheinlichkeit nicht mehr durch Summation über diese Variablen errechenbar

ist. Ferner ist zu bedenken, dass die resultierende Wahrscheinlichkeit ohne Sklarierung außerhalb des darstellbaren Zahlenbereichs liegen würde [Wichern, 2001]. Daher wird in diesen Fällen auf die logarithmische Betrachtung zurück gegriffen. Diese ergibt sich, unter Anwendung verschiedener Zwischenschritte nach [Rabiner und Juang, 1994] zu:

$$\log [P(O|\lambda)] = - \sum_{t=1}^T \log c_t \quad (\text{B.8})$$

Die hierfür erforderlichen Zwischenschritte sind [Rabiner und Juang, 1994] zu entnehmen.

Die Berechnung des Rückwärtsalgorithmus erfolgt erneut analog zum Vorwärtsalgorithmus.

skalierter Rückwärtsalgorithmus:

Initialisierung:

$$\hat{\beta}_T(i) = c_T \quad (\text{B.9})$$

Induktion:

$t = T - 1, \dots, 1$

$$\beta_t(i) \sum_{j=1}^N a_{ij} b_j(O_{t+1}) \hat{\beta}_{t+1}(j), \quad 1 \leq i \leq N \quad (\text{B.10})$$

$$\hat{\beta}_t(i) = c_t \beta_t(i), \quad 1 \leq i \leq N \quad (\text{B.11})$$

Anhang C

Logarithmische Berechnung des Viterbi-Algorithmus

Logarithmische Viterbi-Implementation

$$\delta_t(i) := \max_{s_1, s_2, \dots, s_{t-1}} \log(P(O_1, O_2, \dots, O_t, s_1, s_2, \dots, s_{t-1}, s_t = i | \lambda)) \quad (\text{C.1})$$

Implementatorisch betrachtet erfolgt die Berechnung dieser Pfadwahrscheinlichkeiten logarithmisch [Rabiner und Juang, 1994], unterteilt in folgende Schritte:

Preprocessing:

$$\tilde{\pi}_i = \log(\pi_i), \quad 1 \leq i \leq N \quad (\text{C.2})$$

$$\tilde{b}_i(O_t) = \log[b_i(O_t)], \quad 1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T \quad (\text{C.3})$$

$$\tilde{a}_{ij} = \log(a_{ij}), \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (\text{C.4})$$

Initialisierung:

$$\tilde{\delta}_i = \log(\delta_1(i)) = \tilde{\pi}_i + \tilde{b}_i(O_1), \quad 1 \leq i \leq N \quad (\text{C.5})$$

$$\psi_1(i) = 0, \quad 1 \leq i \leq N \quad (\text{C.6})$$

Rekursion: $2 \leq t \leq T$

$$\tilde{\delta}_t(j) = \log(\delta_t(j)) = \max_{1 \leq i \leq N} [\tilde{\delta}_{t-1}(i) + \tilde{a}_{ij}] + \tilde{b}_j(O_t), \quad 1 \leq j \leq N \quad (\text{C.7})$$

$$\psi_t(j) = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} [\tilde{\delta}_{t-1}(i) + \tilde{a}_{ij}], \quad 1 \leq j \leq N \quad (\text{C.8})$$

Terminierung:

$$\tilde{P}^* = \max_{1 \leq i \leq N} [\tilde{\delta}_T(i)] \quad (\text{C.9})$$

$$q_T^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq N} [\tilde{\delta}_T(i)] \quad (\text{C.10})$$

Pfad-Backtracking:

$$q_t^* = \psi_{t+1}(q_{t+1}^*), \quad t = T-1, T-2, \dots, 1 \quad (\text{C.11})$$

Anhang D

Evaluierungssequenzen

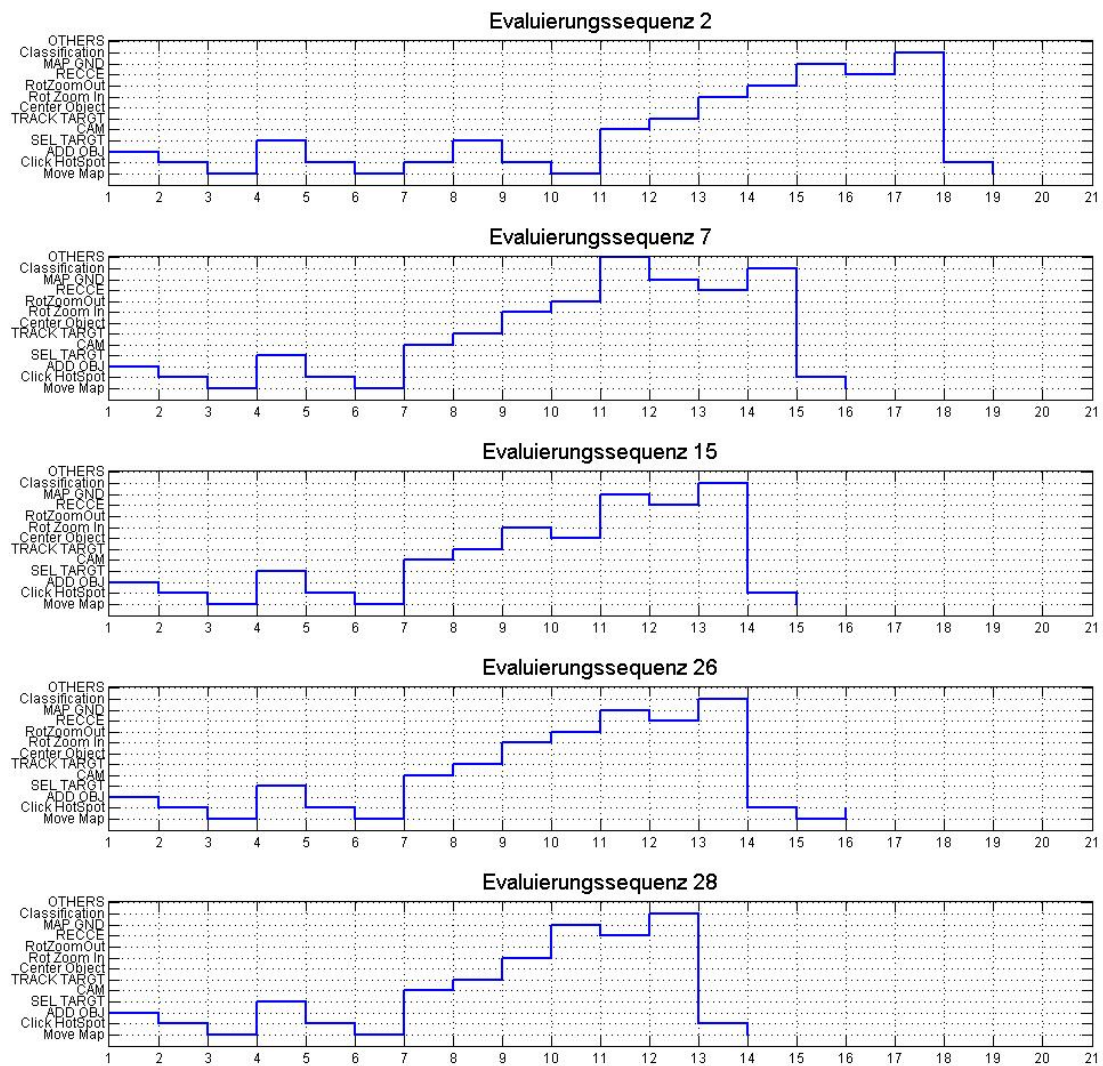
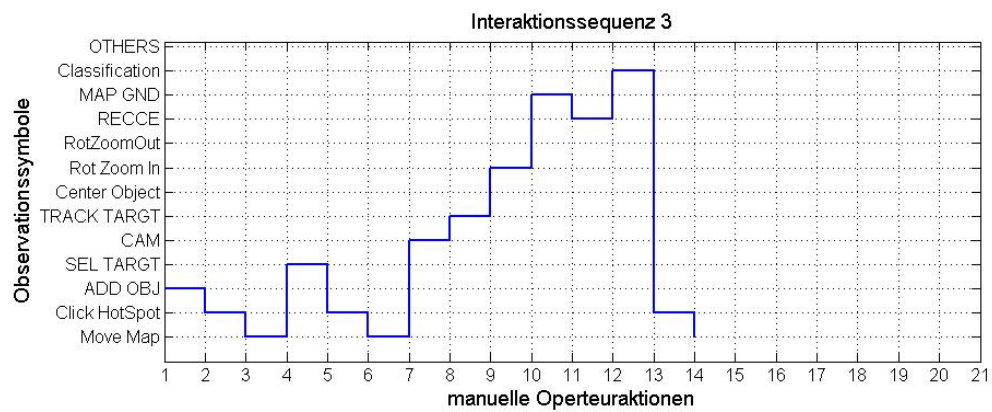
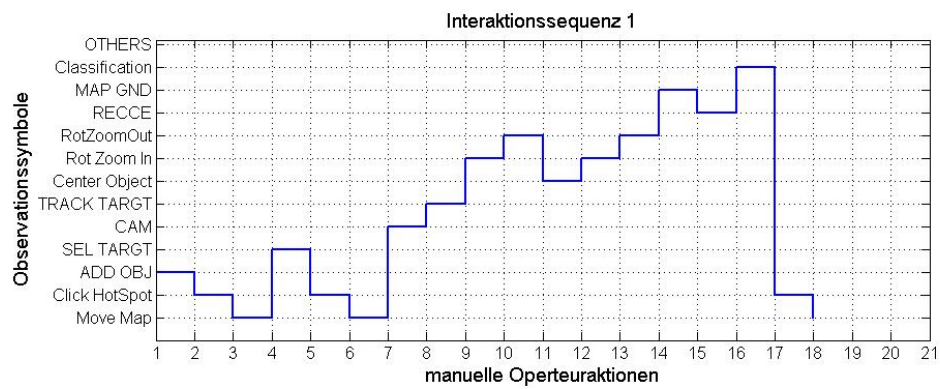
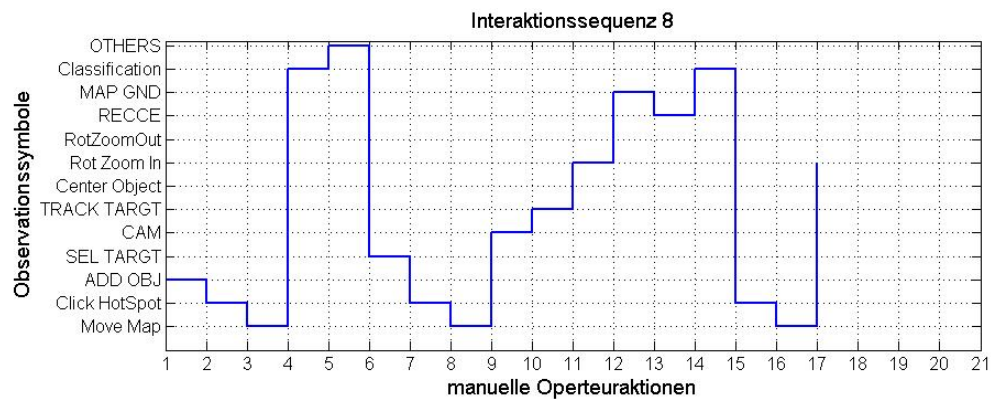
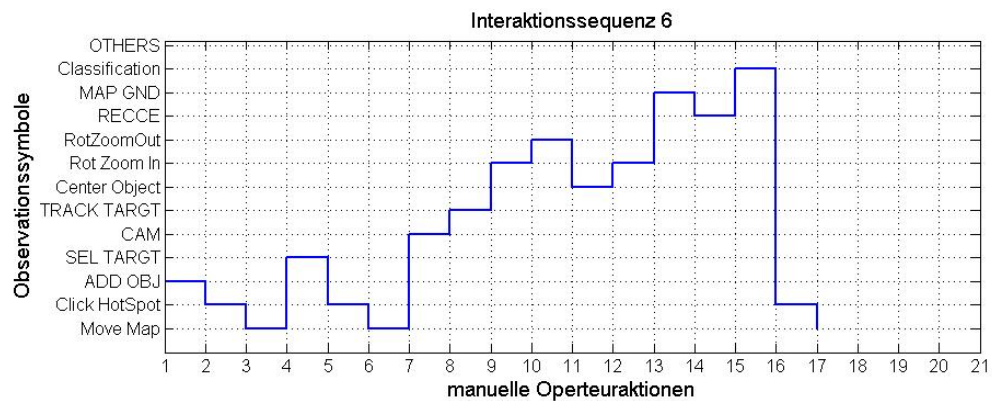
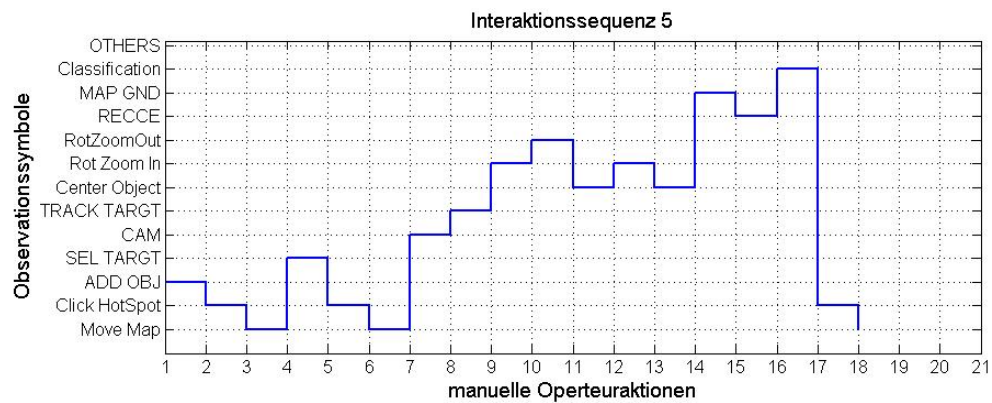
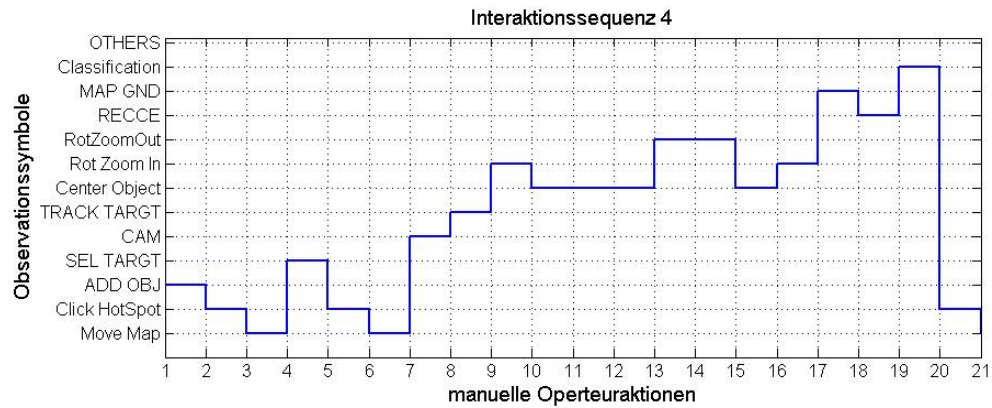


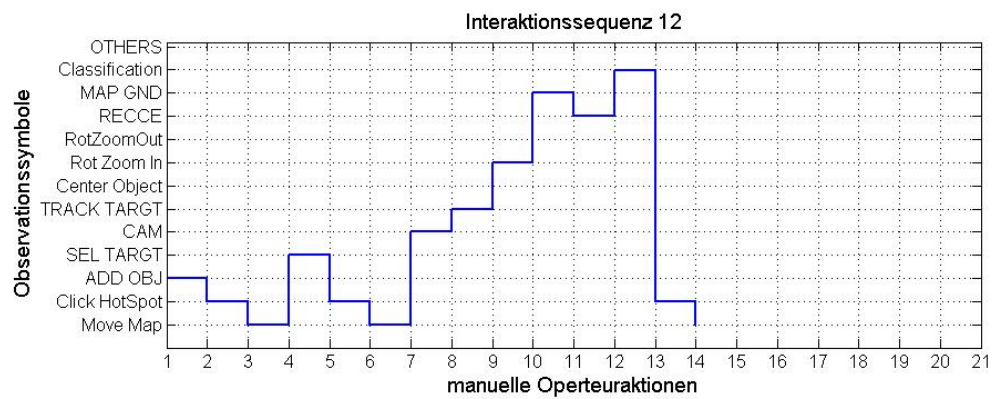
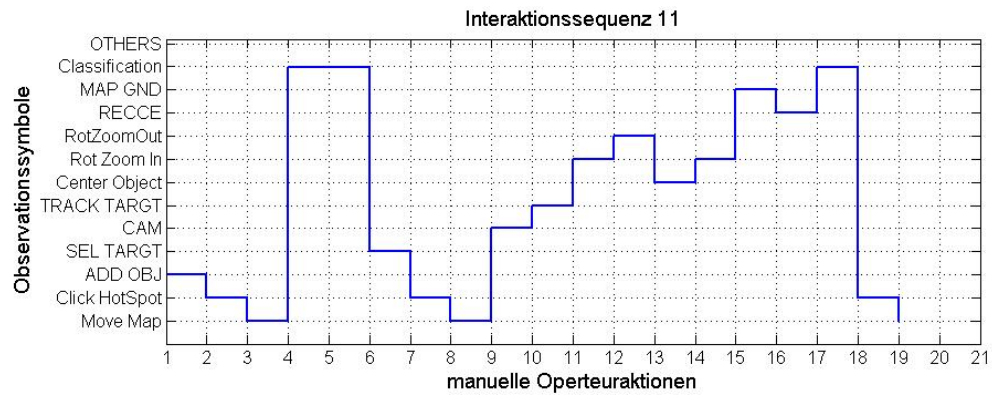
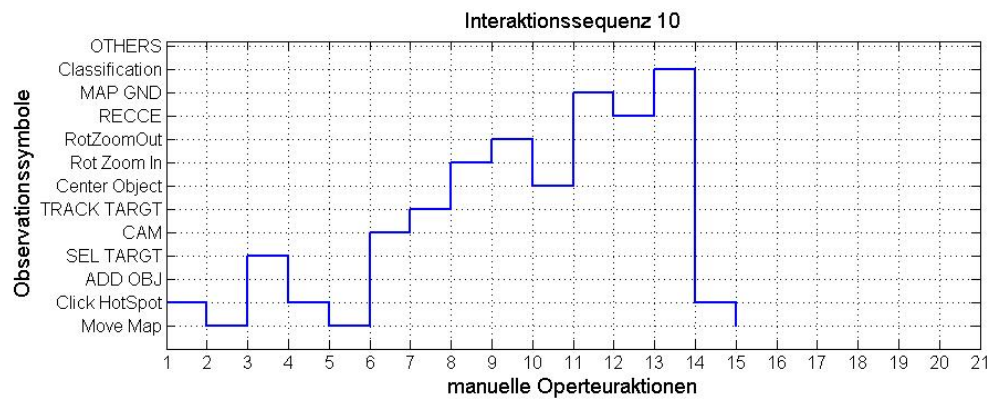
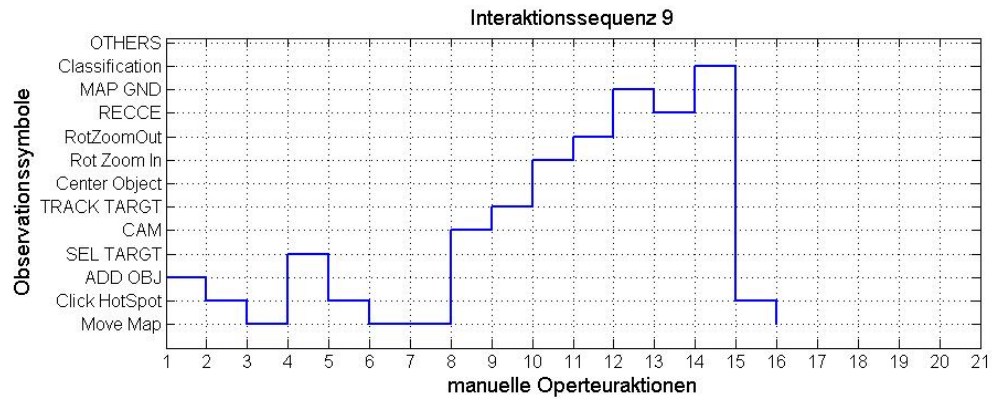
Abbildung D.1: Evaluierungsdatensätze

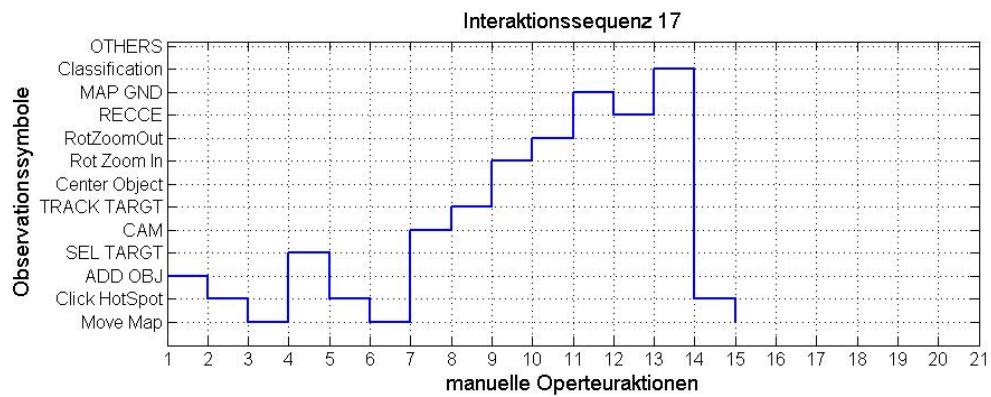
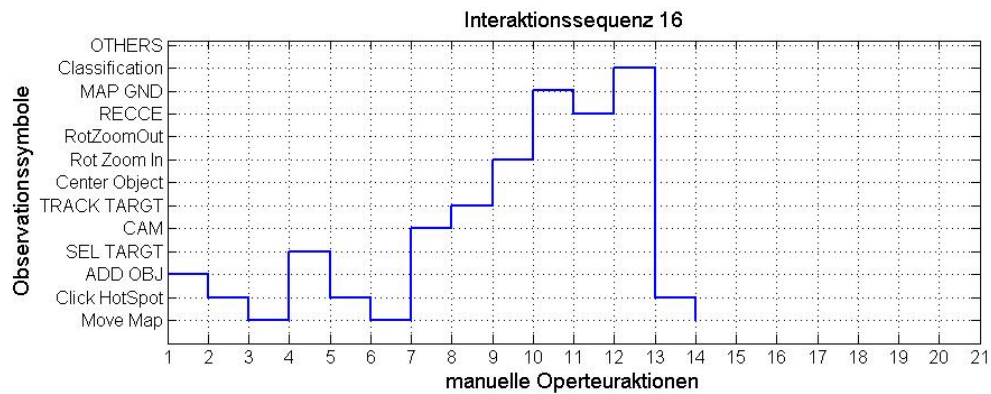
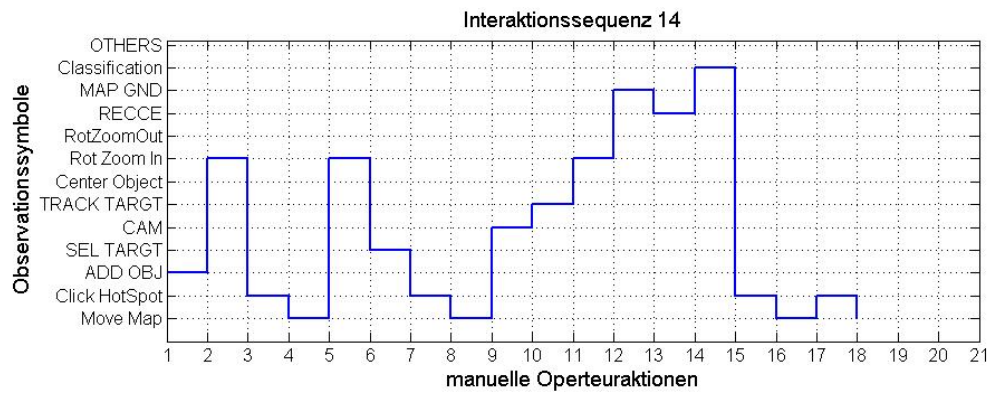
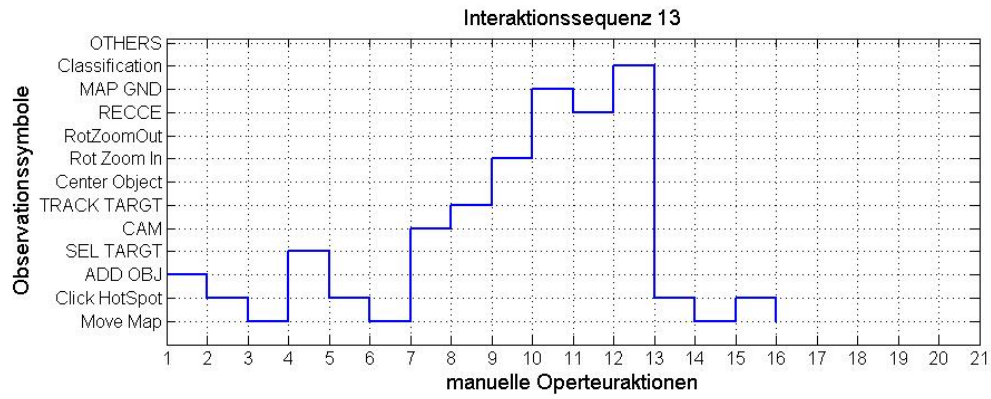
Anhang E

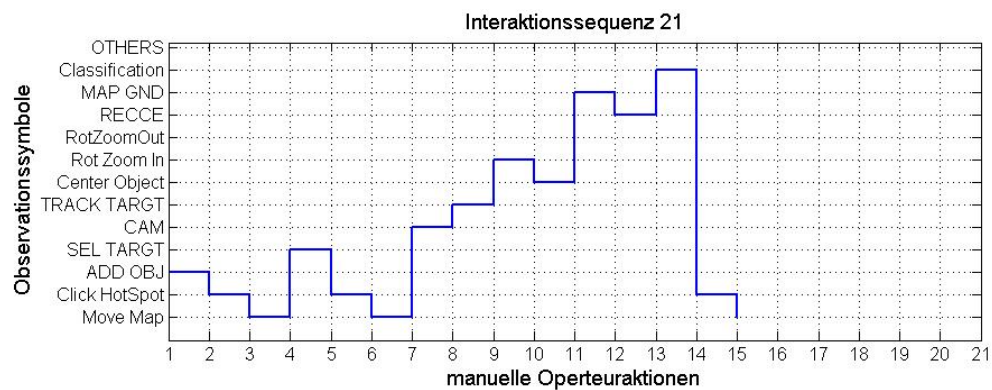
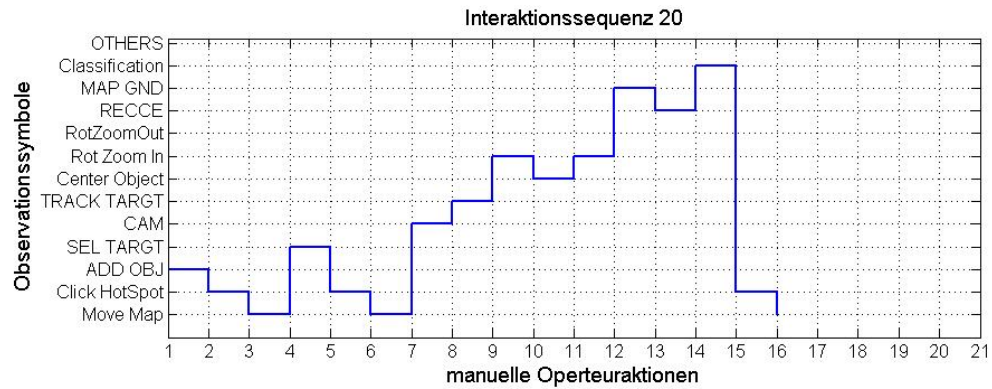
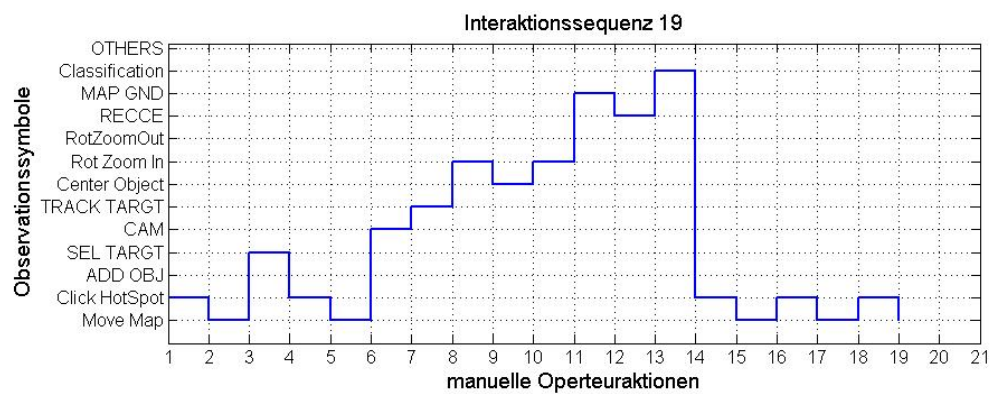
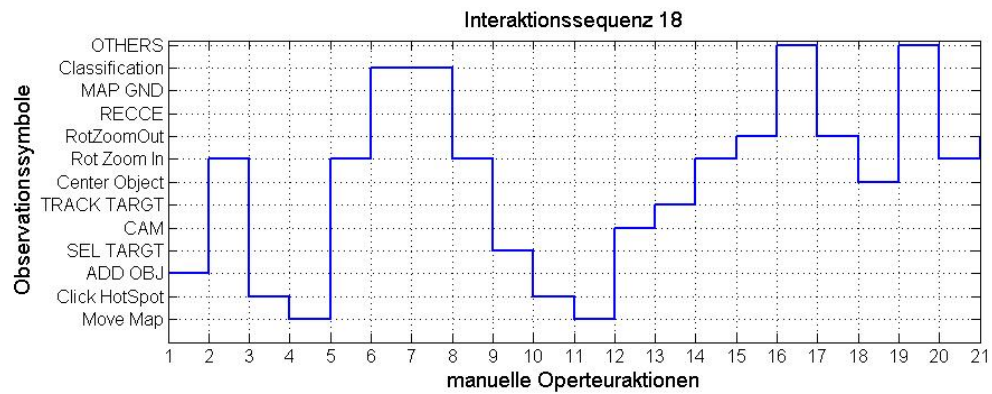
Trainingssequenzen

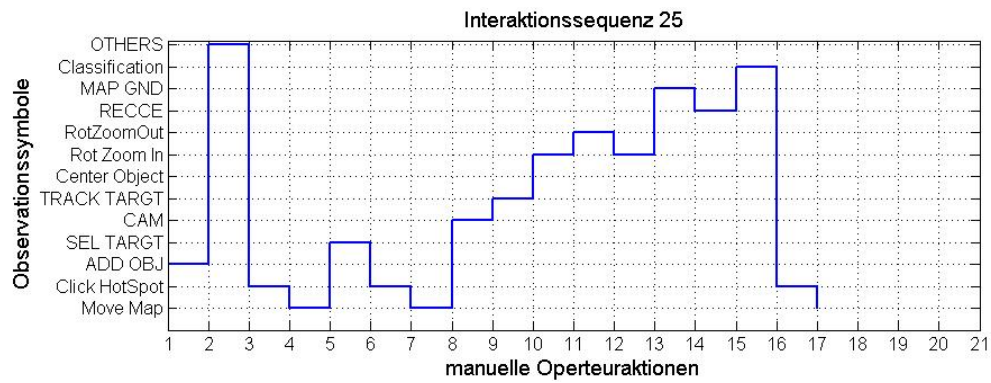
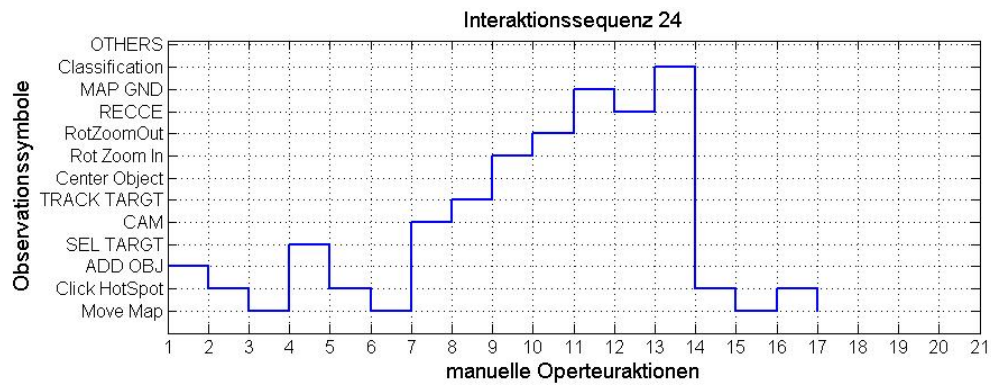
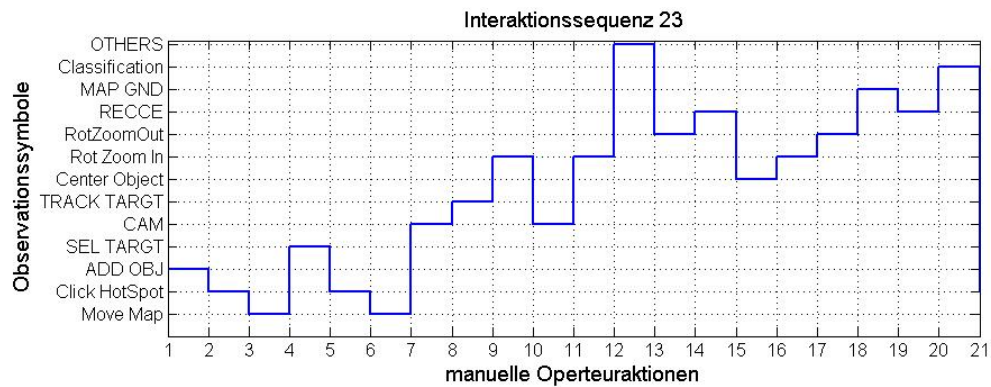
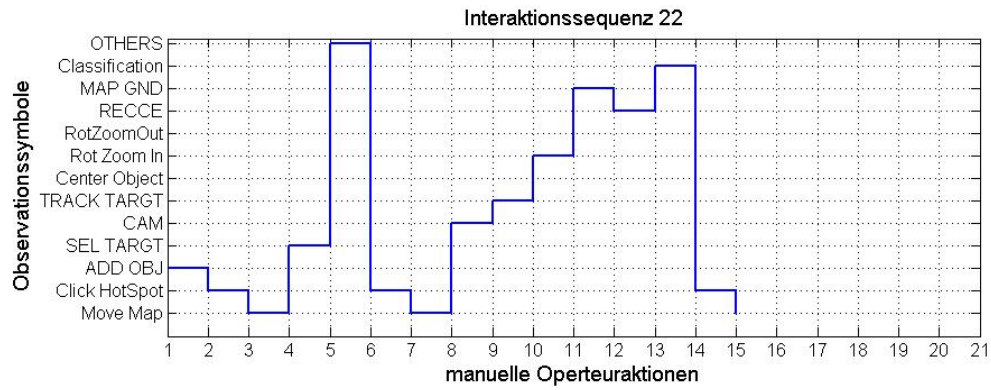


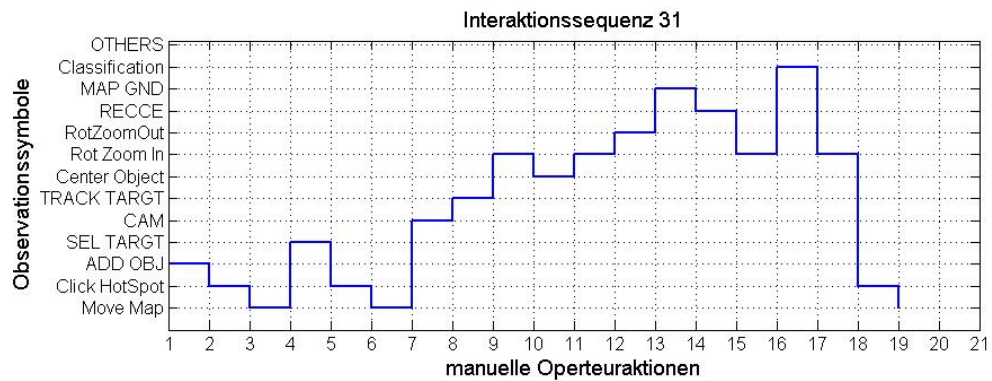
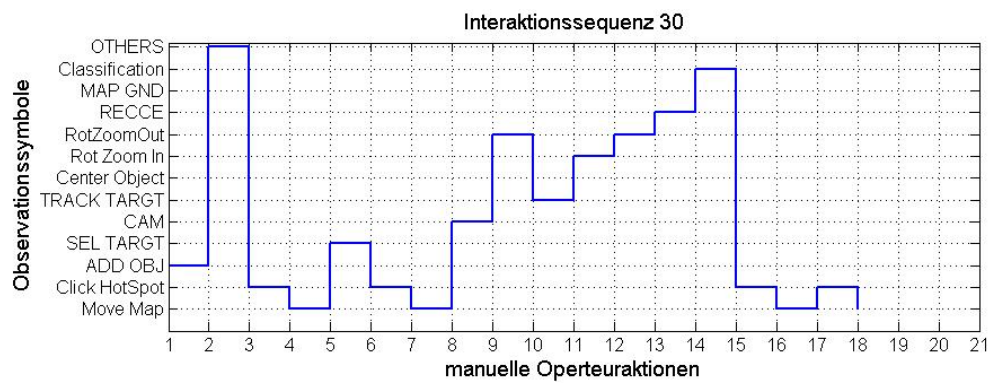
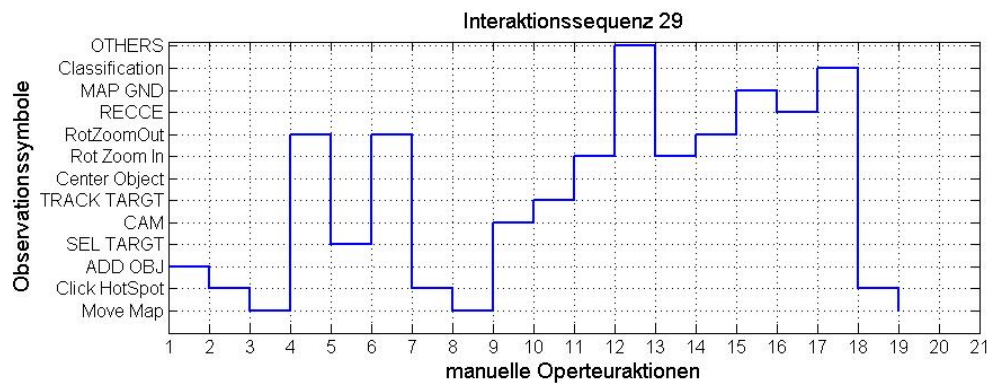
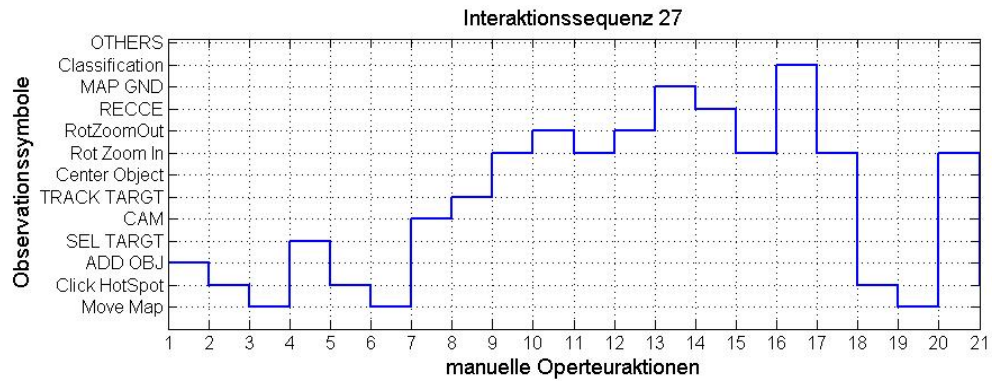


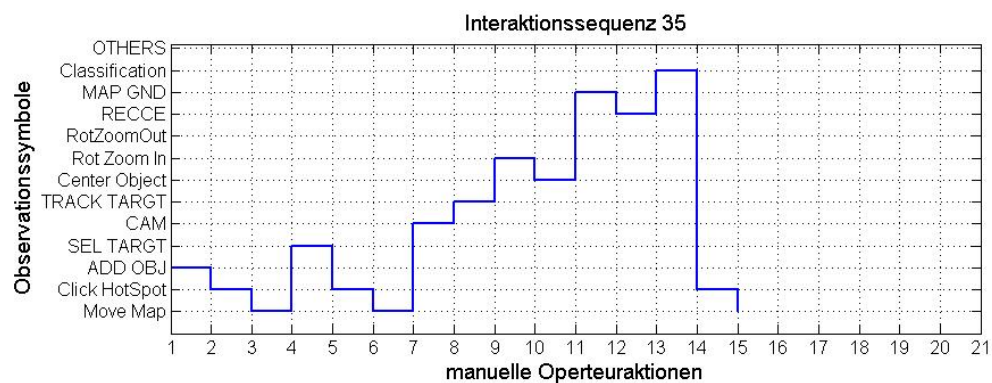
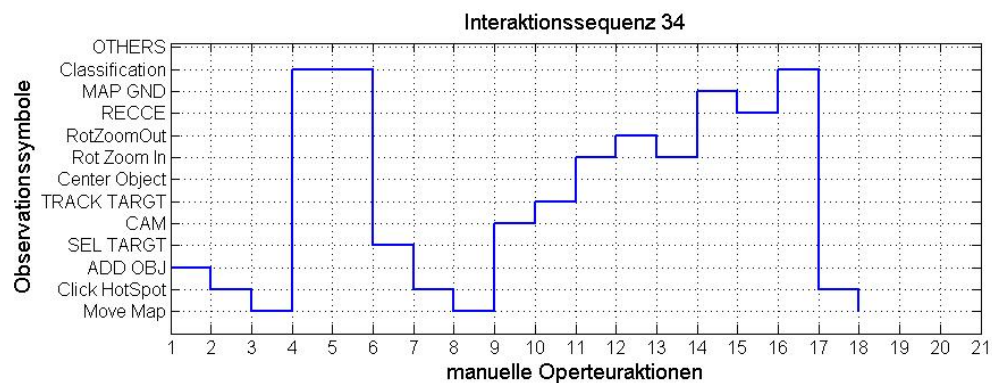
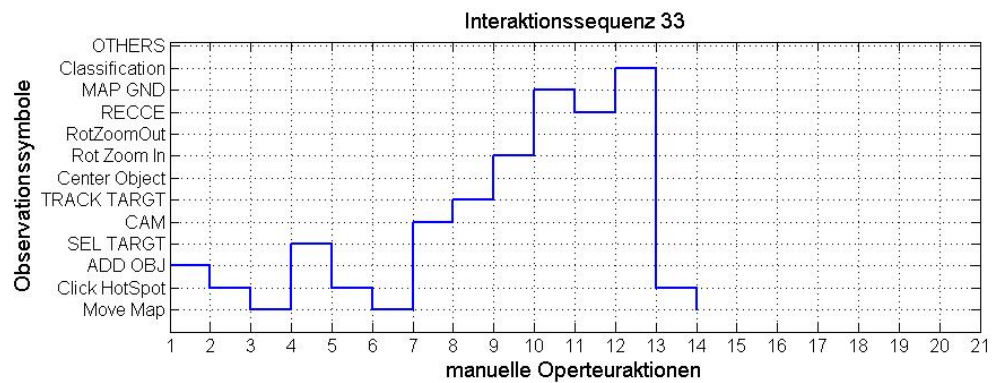
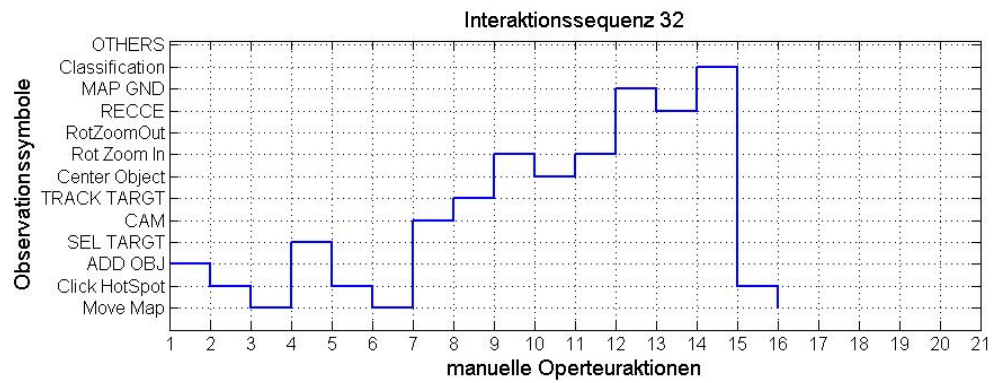


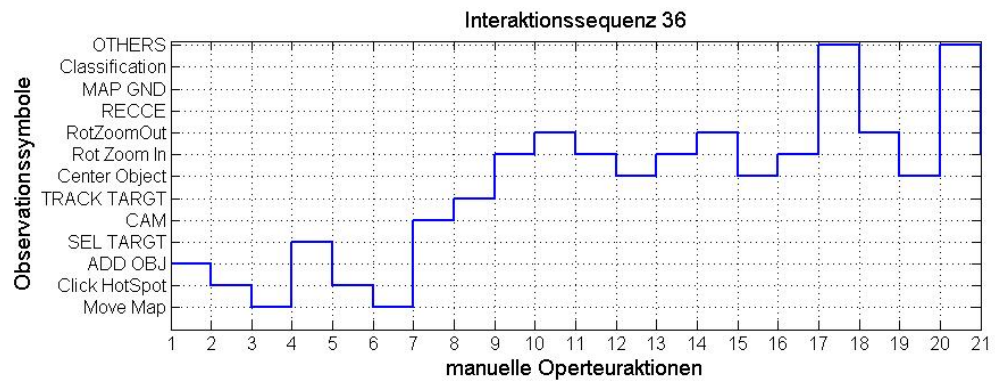












Anhang F

Emissionsmatrizen

Initiale und trainierte Emissionsmatrizen

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die initialen Werte sowie die aus dem Trainingsprozess resultierenden trainierten Werte der Emissionsmatrizen für die untersuchten Konfigurationen *frequency-based*, *uniform* und *random*. Die in den Matrizen dargestellten Werte repräsentieren die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des jeweiligen Observationssymbols ($O_1 - O_{13}$) in den einzelnen Zuständen $S_1 - S_3$.

Den Zuständen $S_1 - S_3$ sind dabei folgende Teilaufgaben zugewiesen.

S_1 : recognise & tag,

S_2 : classify,

S_3 : insert result

Die Observationssymbole ($O_1 - O_{13}$) bezeichnen folgende Einzel-Observationen:

O_1 : move map, O_2 : click hotspot, O_3 : add object, O_4 : select target, O_5 : cam, O_6 : track target,

O_7 : center object, O_8 : zoom in, O_9 : zoom out, O_{10} : recce, O_{11} : map gnd, O_{12} : classification,

O_{13} : others

Die Darstellung der einzelnen Matrizen erfolgt aufgrund der Größe auf den nachfolgenden Seiten im Querformat.

B_{cb}	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}	O_{11}	O_{12}	O_{13}
S_1	0.339	0.314	0.1446	0.157	0	0	0	0.0207	0.0083	0	0	0.0248	0.0207
S_2	0	0	0	0	0.1644	0.1598	0.0959	0.2557	0.1324	0.0046	0.1553	0	0.0302
S_3	0.2676	0.2738	0	0	0	0	0	0.0207	0	0.2083	0	0.2083	0.0060

 Tabelle F.1: Initial-Emissionsmatrix ($B_{\text{count-based}}$)

$B_{t,cb}$	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}	O_{11}	O_{12}	O_{13}
S_1	0.3103	0.3054	0.1429	0.1527	0	0	0	0.0246	0.0099	0	0	0.0345	0.0197
S_2	0	0	0	0	0.1566	0.1517	0.1077	0.2566	0.1376	0.0143	0.0143	0	0.0294
S_3	0.2758	0.2758	0	0	0	0	0	0.0374	0	0.1956	0	0.2085	0.0067

 Tabelle F.2: Trainierte-Emissionsmatrix ($B_{t,\text{count-based}}$)

$B_{u,f}$	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}	O_{11}	O_{12}	O_{13}
S_1	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13
S_2	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13
S_3	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13	1/13

 Tabelle F.3: Initial-Emissionsmatrix (B_{uniform})

$B_{t,u,f}$	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}	O_{11}	O_{12}	O_{13}
S_1	2.5313^{-01}	0.2398	0.6914	3.6216^{-18}	7.7904^{-130}	0	0	0.0371	1.4333^{-22}	0	0	1.5141^{-78}	0.0315
S_2	0.3612	0.3455	1.6932^{-06}	0.2162	0.0115	1.1540^{-13}	2.438^{-92}	0.0107	1.4702^{-4}	7.8282^{-147}	7.3689^{-94}	0.0359	0.0189
S_3	0.1475	0.1240	0	0.0065	0.0798	0.0811	0.0576	0.1570	0.0784	0.0837	0.0785	0.0870	0.0188

 Tabelle F.4: Trainierte-Emissionsmatrix ($B_{t,\text{uniform}}$)

B_r	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}	O_{11}	O_{12}	O_{13}
S_1	0.0843	0.1084	0.0602	0.1205	0.0964	0.1205	0.0602	0.0723	0.0602	0.0241	0.0602	0.1205	0.0120
S_2	0.0423	0.0282	0.0563	0.0282	0.0563	0.0986	0.0986	0.1408	0.0986	0.0563	0.0986	0.0986	0.0986
S_3	0.0532	0.0426	0.0851	0.0319	0.1064	0.0957	0.01064	0.0851	0.0957	0.1064	0.1064	0.0216	0.0638

Tabelle F.5: Initial-Emissionsmatrix (B_{random})

B_{t_r}	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}	O_{11}	O_{12}	O_{13}
S_1	0.3072	0.3068	0.1435	0.1534	5.3939^{-05}	2.1645^{-31}	2.7765^{-175}	0.0247	0.0099	1.1432^{-186}	1.0295^{-297}	0.0346	0.0198
S_2	0.0115	1.0847^{-14}	0	1.8204 ⁻⁷¹	0.3952	03830	2.2993^{-05}	01837	0.0266	3.2269^{-26}	1.458^{-08}	2.0667^{-144}	1.3389^{-06}
S_3	0.1502	0.1502	0	1.4168^{-114}	4.2965^{-19}	5.0715^{-08}	0.0806	0.1580	0.0947	0.1172	0.1099	0.1136	0.0256

Tabelle F.6: Trainierte-Emissionsmatrix ($B_{t_{\text{random}}}$)

Anhang G

Sakkaden und Fixationen

Sakkaden bezeichnen schnelle, kurze, sprunghafte Bewegungen des Auges (bis $800^\circ/\text{sec}$) mit dem Ziel den zentralen Bereich der Fovea auf Blickziele auszurichten. Sie können sowohl bewusst (willentlich) als auch unbewusst (reflexartig) ausgelöst werden. Reflexartige Sakkaden lassen sich bei Veränderungen im peripheren Gesichtsfeld beobachten. Hier springt der Blickfokus des Probanden automatisch auf den Ort der Veränderung bzw. des Reizes. Demgegenüber basieren willentlich ausgeführte Sakkaden auf gezielten Handlungsplänen, um ein visuelles Objekt genauer betrachten zu können. Ziel, Richtung und Größe einer Sakkade werden im Vorfeld festgelegt und können während der Ausführung nicht mehr beeinflusst werden (*ballistischen Bewegung*) [Hristov, 2009]. Während einer Sakkade findet keine visuelle Informationsverarbeitung statt. Auch kurz vor einer Sakkade (ca. 30-40 Millisekunden), sowie bis zu 100-120 Millisekunden nach einer Sakkade findet keine visuelle Informationsaufnahme statt. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer „*saccadic suppression*“ [Zuber und Stark, 1966] oder „*saccadic omission*“ [Campbell und Wurtz, 1978].

Fixationen bezeichnen Zustände, in denen eine visuelle Informationsaufnahme möglich ist. Hierbei wird der Blick auf ein bestimmtes Objekt fokussiert. Das Auge findet sich zu dieser Zeit in einer relativen Bewegungslosigkeit. Fixationen sind charakterisiert durch zeitliche und örtliche Merkmale. Das zeitliche Merkmal bezeichnet die minimale Verweildauer des Auges auf einem Objekt, ab der von einer Fixation gesprochen werden kann (minimale Fixationsdauer). Das örtliche Merkmal umfasst den Bereich, in dem so genannte Mikrokorrekturen des Auges auf ein Objekt noch einer Fixation zugeordnet werden können (Fixationsradius). Unter Berücksichtigung der „*saccadic suppression*“ ergibt sich, dass erst ab einer minimalen Fixationsdauer von etwa 100 Millisekunden von einer Fixation gesprochen werden kann. Typische Verweildauern von Fixationen liegen im Bereich von 250-300 Millisekunden.